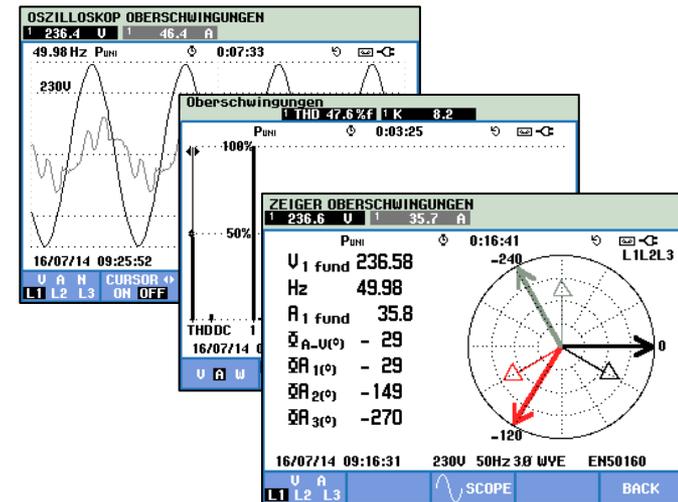


# Verbesserung der Netzqualität durch aktive harmonische Filter

TU Darmstadt  
Vortragsreihe „Verein der SRT-Freunde“

30. April 2015



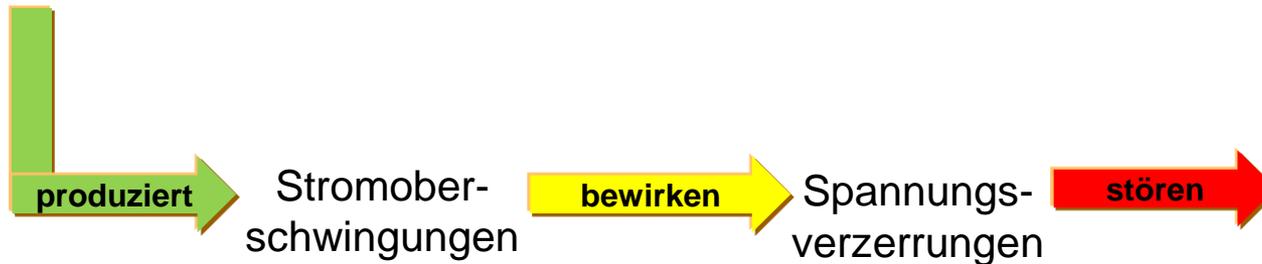
Dr.-Ing. Peter Matthes  
[www.emaconpower.com](http://www.emaconpower.com)

1. Grundbegriffe zur Netzqualität
2. Messung von Strom- und Spannungsverzerrungen
3. Funktionsweise aktiver Filter
4. Dimensionierung und Auslegung
5. Stand der Technik
6. Anwendungsbeispiele

# 1. Netzqualität (Power Quality)

# Oberschwingungen verschlechtern Netzqualität

- **Theorie: ideale elektrische Energieversorgung**
  - konstante Frequenz (50Hz)
  - ideale sinusförmige Ströme und Spannungen
  - konstante Netzspannung (230V, 400V, 690V)
  - symmetrische Belastung der 3 Phasen L1, L2, L3
  - keine Spannungseinbrüche oder -unterbrechungen
  
- **Realität: zunehmender Einsatz von Leistungselektronik**
  - entnimmt dem speisenden Netz nicht-sinusförmige Ströme



andere angeschlossene Verbraucher

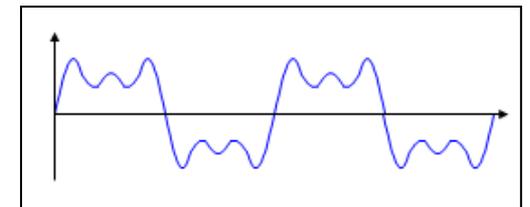
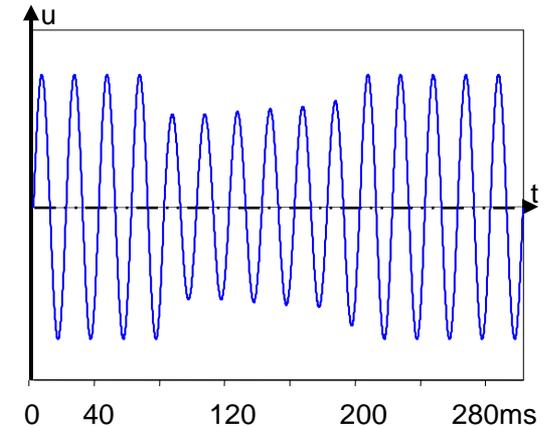
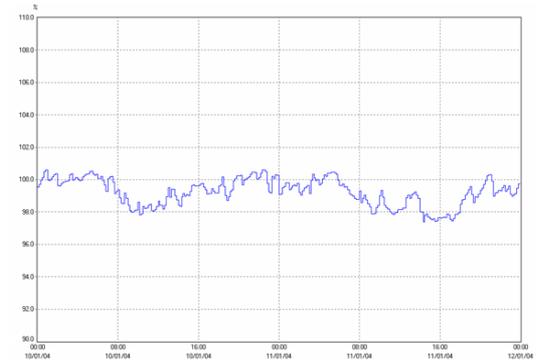
## Verursacher von Netzurückwirkungen (Beispiele)

### ■ Lasten

- Schalten großer Lasten
- veränderliche Lasten (Aufzüge, Pressen, Sägen, ...)
- Betrieb von geschalteten Blindstromkompensationsanlagen
- Schweiß-Anlagen
- unsymmetrische Lasten
- Blitzschlag
- ...

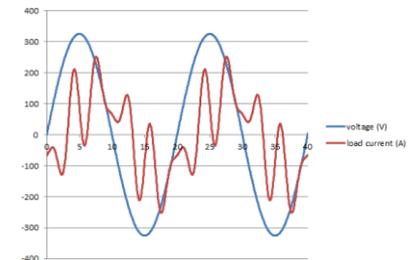
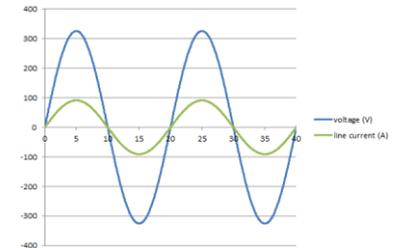
### ■ Schalthandlungen im Netz

- Schalten von Transformatorstufen
- Kurzschluss
- Erdschluss
- Schalthandlungen an Übertragungsleitungen, Transformatoren oder Kondensatorbänken



## Lineare und nicht-lineare Lasten

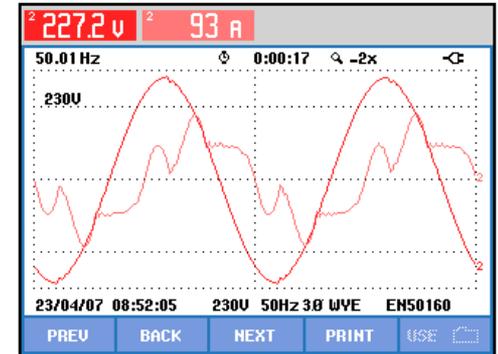
- **Lineare Lasten** → entnehmen dem Netz eine sinusförmigen Strom (bei sinusförmiger Spannung)
  - Glühlampen
  - Heizer
  - Asynchronmaschinen
  
- **Nicht-lineare Lasten** → entnehmen dem Netz einen nicht-sinusförmigen Strom, trotz sinusförmiger Spannung (“harmonic generators”)
  - USV Anlage
  - Computer Netzteile
  - Induktionsöfen
  - Schweiß-Anlagen
  - Batterie-Ladegeräte
  - elektronische Vorschaltgeräte (Lampen)
  - Umrichter
  - Drehzahlvariable Antriebe



## Einteilung von Netzurückwirkungen

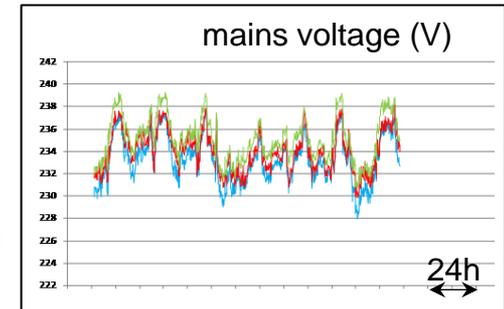
### ▪ Oberschwingungen

- Harmonische und Interharmonische
- Bereich für aktive harmonische Filter: bis zur 49. Harmonischen, in Ausnahmefällen auch darüber



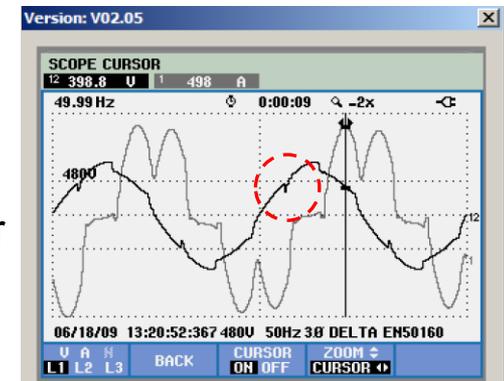
### ▪ Spannungsveränderungen

- Spannungsänderung
- Spannungsunsymmetrie zwischen den Phasen
- Flicker = subjektiver Eindruck von Leuchtdichteschwankungen (Glühlampen, Leuchtstoffröhren) auf Grund der Spannungsschwankungen



### ▪ Kommutierungseinbrüche

- zeitweise Absenkung der Spannung als Folge des Schaltverhaltens von Stromrichtern (Kommutierung von einer Phase auf die andere)



## Begriffe

- Gesamtstrom (Total current)

$$I_{RMS} = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + I_5^2 + \dots}$$

- Verzerrungsstrom (Total harmonic current)

$$THC = \sqrt{\sum_2^{50} I_v^2}$$

- Gesamt-Verzerrungsfaktor (Total harmonic current distortion)

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_2^{50} I_v^2}}{I_1}$$

(Berechnung für Spannung identisch.)

## Begriffe

P = Wirkleistung

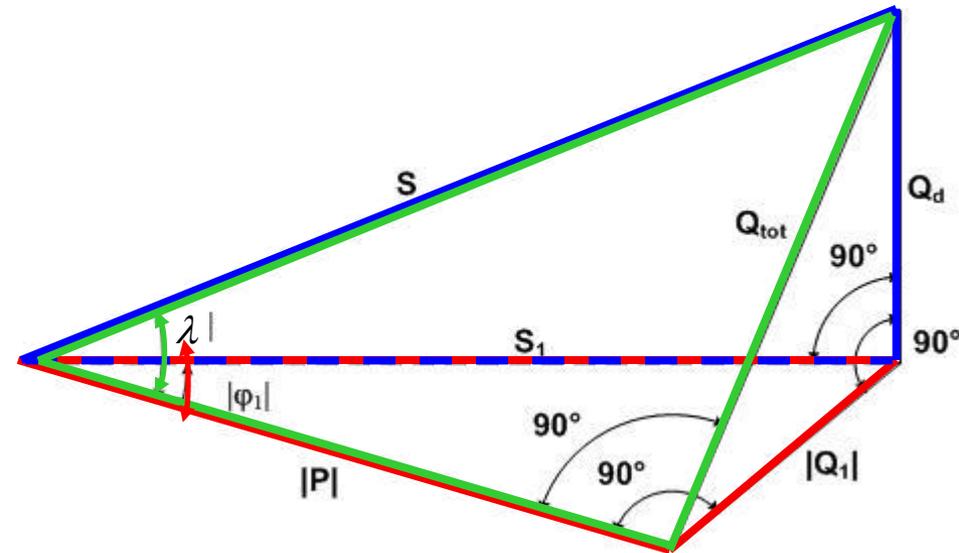
S = Scheinleistung (1 = Grundschiwingung)

Q = Blindleistung (1 = Grundschiwingung)

$Q_d$  = Verzerrungsblindleistung

$Q_{tot}$  = Gesamtblindleistung (total)

vereinfachende Annahme: sinusförmige Spannung



### Wirkfaktor - Displacement PF (cos φ)

für sinusförmige Größen!

$$PF_{displacement} = \cos \varphi = \frac{P}{S_1} = \frac{I_{real}}{I_1}$$

### Leistungsfaktor - True PF (λ)

Gesamt-Leistungsfaktor

$$PF_{tot} = \lambda = \frac{P}{S} = PF_{displacement} * PF_{distortion}$$

### Distortion PF

nicht-sinusförmige Größen

$$PF_{distortion} = \frac{S_1}{S} = \frac{I_1}{I_{tot}} = \sqrt{\frac{1}{1 + THDi^2}}$$

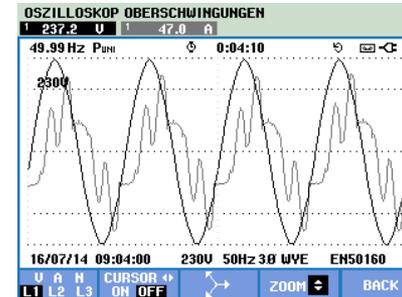
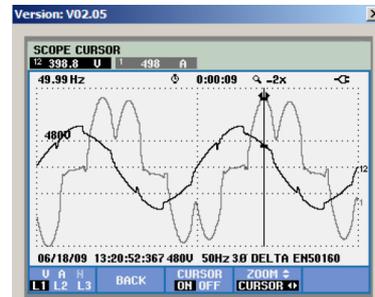
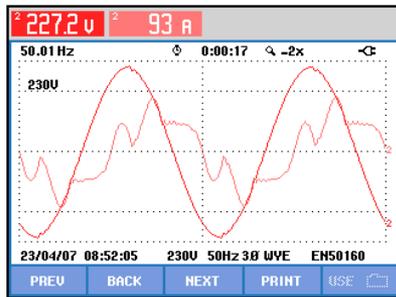
$$S^2 = P^2 + Q_1^2 + Q_d^2$$

$$THDi = \frac{I_{harmonic}}{I_1} \times 100\%$$

# Oberschwingungen

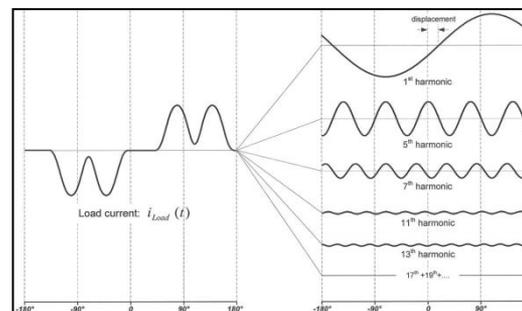
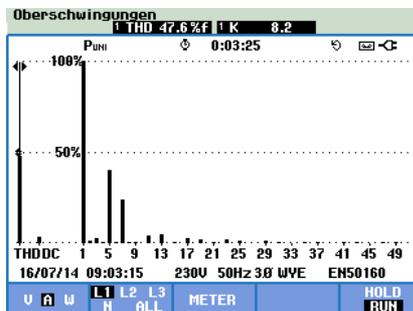
## ■ Oberschwingungen

- sinusförmige Schwingungen
- Ganzzahlige Vielfache der Grundfrequenz 50Hz (Harmonische)
- Nicht-ganzzahlige Vielfache der Grundfrequenz 50Hz (Interharmonische)

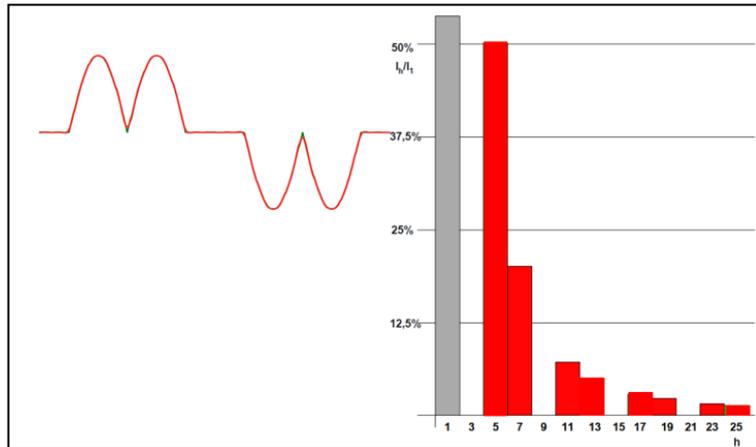
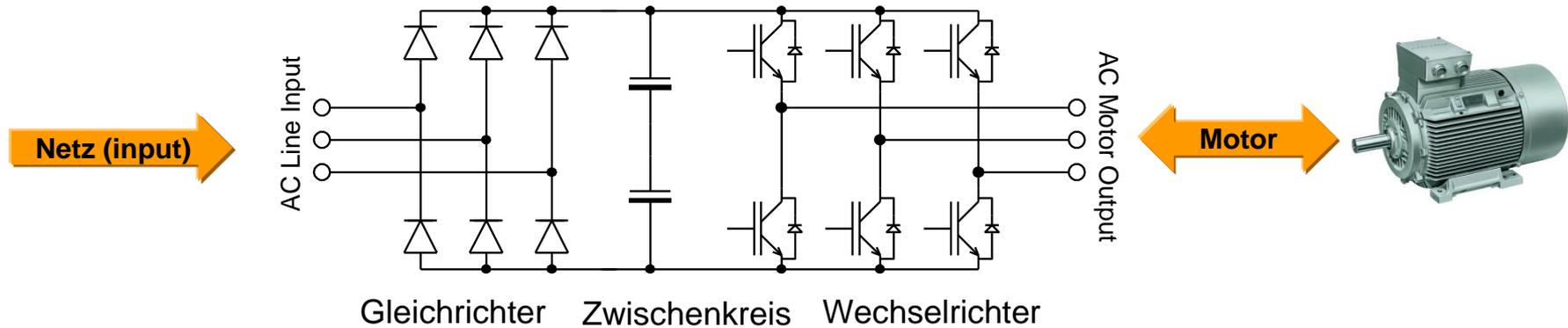


## ■ Mathematische Beschreibung

- Fourier Analyse
- jede beliebige Kurvenform kann aus der Addition von Oberschwingungen unterschiedlicher Phase und Amplitude zusammengesetzt werden

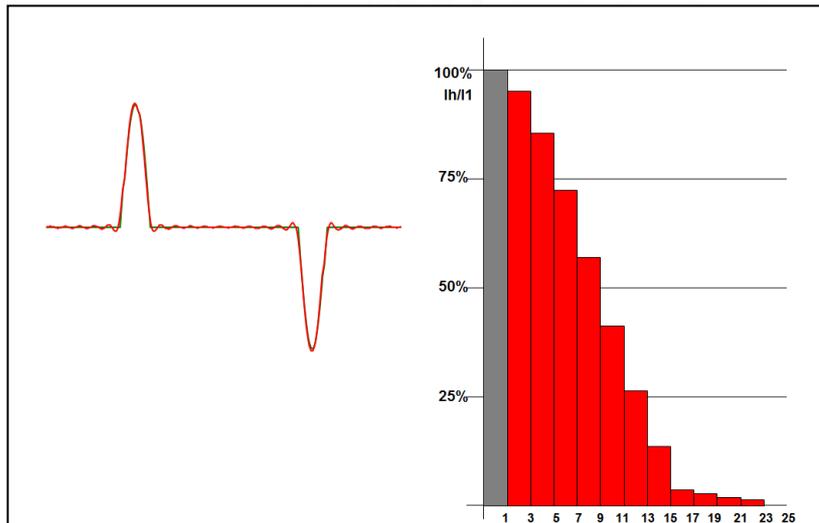
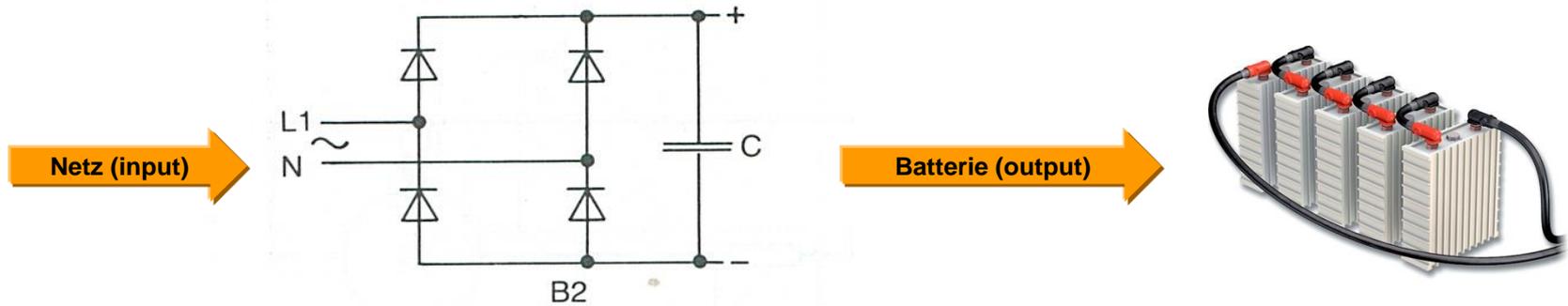


# Beispiel: Oberschwingungen eines Frequenzumrichters



Eingangsstrom des Frequenzumrichters:  
typisches Oberschwingungsspektrum  
(hier bis 25. Harmonischen dargestellt)

# Beispiel: Oberschwingungen eines einphasigen Batterieladegerätes



Eingangsstrom des Ladegerätes:  
typisches Oberschwingungsspektrum  
(hier bis 25. Harmonischen dargestellt)

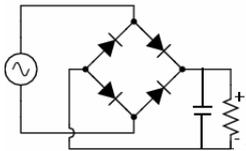
# Typische Harmonische bei Brückengleichrichtern

- Pulszahl (Anzahl Dioden) → bestimmen Harmonische
- symmetrischer Aufbau → nur ungerade Harmonische

$$h = n \cdot p \pm 1$$

$h$  = Harmonische,  $p$  = Pulszahl,  $n$  = Laufvariable (1, 2, 3, ...)

Wechselstrombrücke  
( $p=4$ )



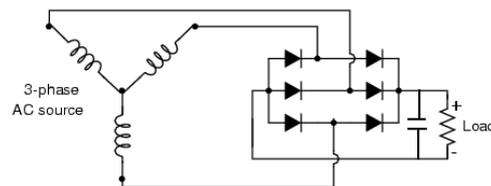
$h = 3 \text{ \& } 5 \quad (n=1)$

$h = 7 \text{ \& } 9 \quad (n=2)$

$h = 11 \text{ \& } 13 \quad (n=3)$

...

Drehstrombrücke  
( $p=6$ )



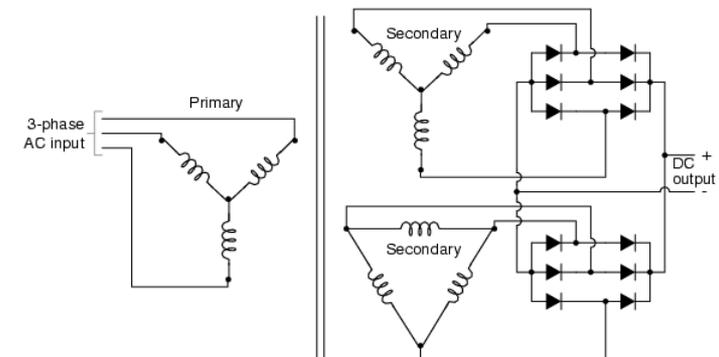
$h = 5 \text{ \& } 7 \quad (n=1)$

$h = 11 \text{ \& } 13 \quad (n=2)$

$h = 17 \text{ \& } 19 \quad (n=3)$

...

Zwölfpuls-Gleichrichter  
( $p=12$ )



$h = 11 \text{ \& } 13 \quad (n=1)$

$h = 23 \text{ \& } 25 \quad (n=2)$

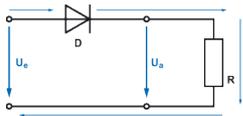
$h = 35 \text{ \& } 37 \quad (n=3)$

...

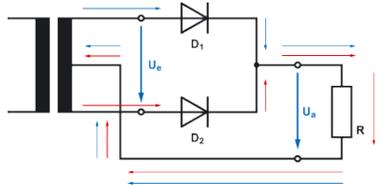
# Geradzahlige Oberschwingungen

- Geradzahlige Oberschwingungen → Schaltungen nur bei sehr kleinen Leistungen üblich

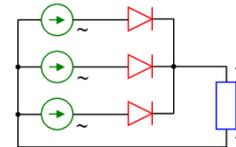
Einweg-Gleichrichter



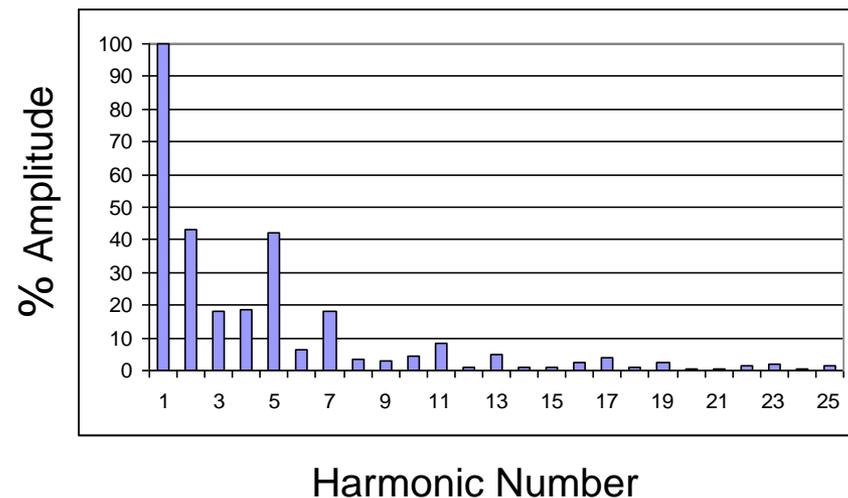
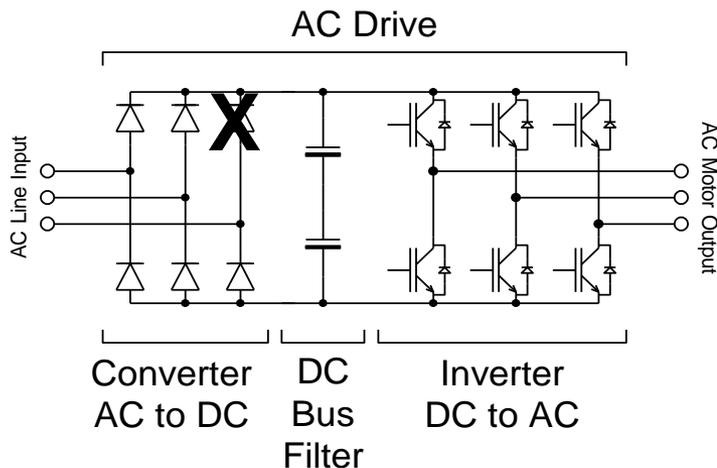
Zweiweg-Gleichrichter



Dreipuls-Gleichrichter

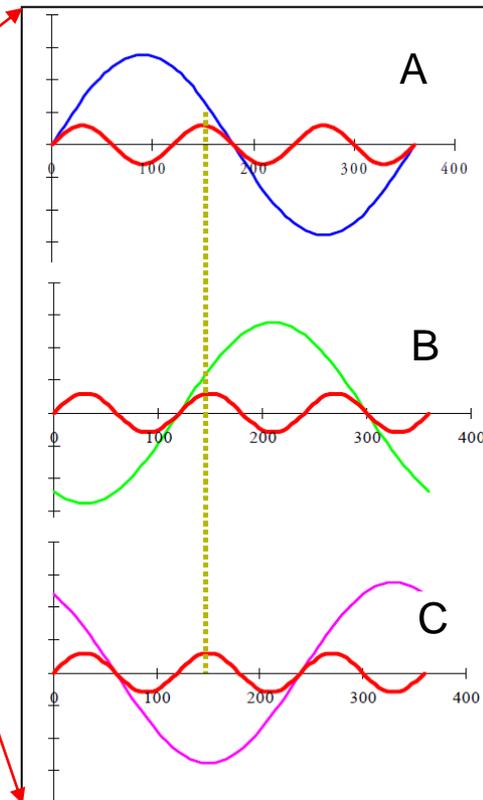


- Geradzahlige Oberschwingungen bei symmetrischen Gleichrichterbrücken → Defekt im Gerät (oder temporärer Vorgang während der Messung)



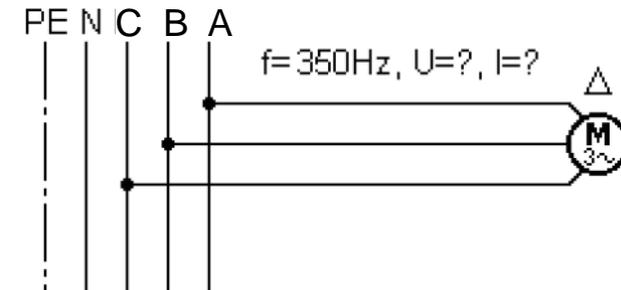
# Entstehung von Drehfeldern der harmonischen Komponenten

Fundamental	<b>A</b> $0^\circ$	<b>B</b> $120^\circ$	<b>C</b> $240^\circ$	<b>A-B-C</b>
3rd harmonic	<b>A'</b> $3 \times 0^\circ$ $(0^\circ)$	<b>B'</b> $3 \times 120^\circ$ $(360^\circ = 0^\circ)$	<b>C'</b> $3 \times 240^\circ$ $(720^\circ = 0^\circ)$	<i>no rotation</i>
5th harmonic	<b>A''</b> $5 \times 0^\circ$ $(0^\circ)$	<b>B''</b> $5 \times 120^\circ$ $(600^\circ - 720^\circ - 120^\circ)$ $(-120^\circ)$	<b>C''</b> $5 \times 240^\circ$ $(1200^\circ - 1440^\circ - 240^\circ)$ $(-240^\circ)$	<b>C-B-A</b>
7th harmonic	<b>A'''</b> $7 \times 0^\circ$ $(0^\circ)$	<b>B'''</b> $7 \times 120^\circ$ $(840^\circ - 720^\circ + 120^\circ)$ $(120^\circ)$	<b>C'''</b> $7 \times 240^\circ$ $(1680^\circ - 1440^\circ + 240^\circ)$ $(240^\circ)$	<b>A-B-C</b>
9th harmonic	<b>A''''</b> $9 \times 0^\circ$ $(0^\circ)$	<b>B''''</b> $9 \times 120^\circ$ $(1080^\circ = 0^\circ)$	<b>C''''</b> $9 \times 240^\circ$ $(2160^\circ = 0^\circ)$	<i>no rotation</i>

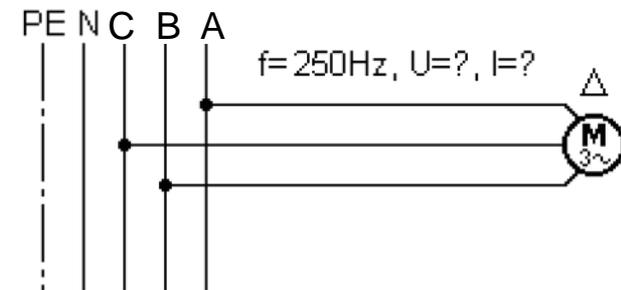


# Mitsystem, Gegensystem und Nullsystem

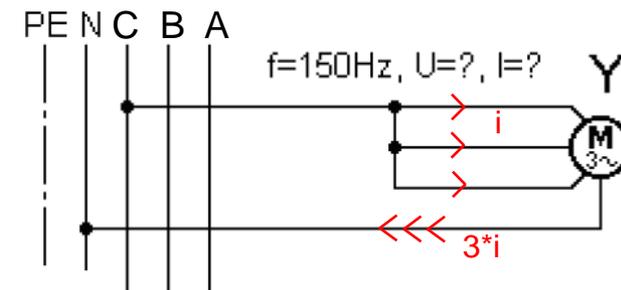
- Harmonisches Drehfeld in Richtung der Grundschwingung → Mitsystem A-B-C (1,4,7,10,13,...)
  - Summe aller Ströme = 0



- Harmonisches Drehfeld entgegen der Grundschwingung → Gegensystem C-B-A (2,5,8,11,...)
  - sum of current = 0

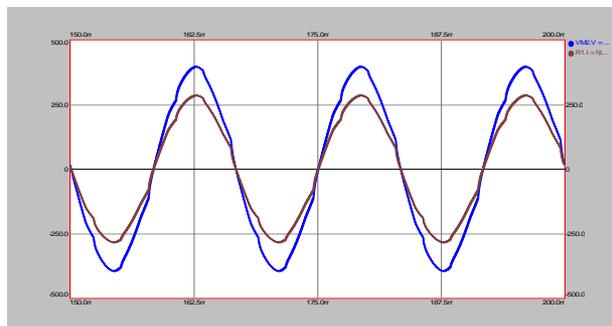
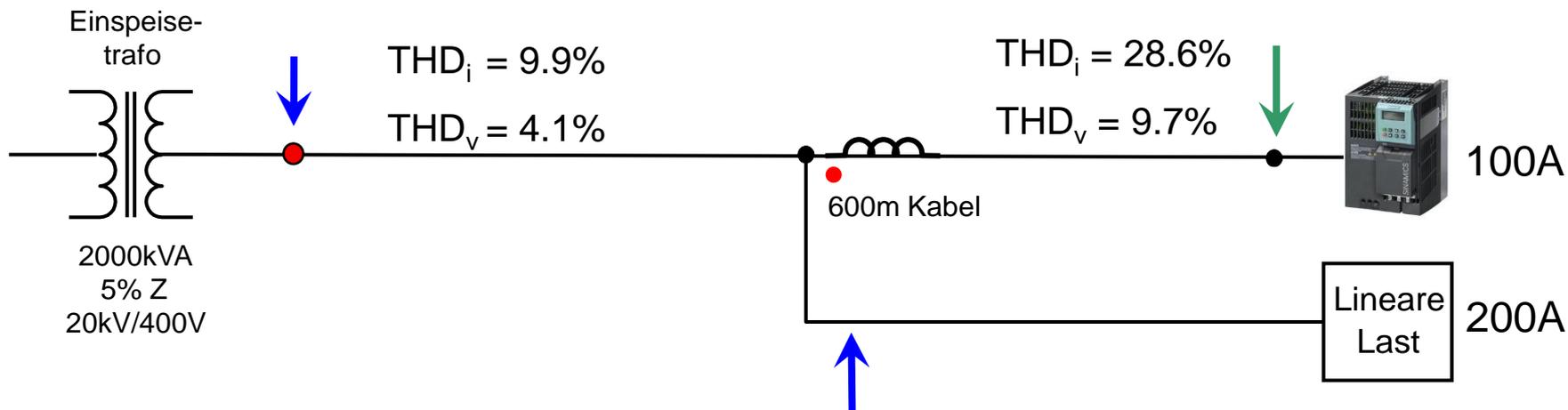
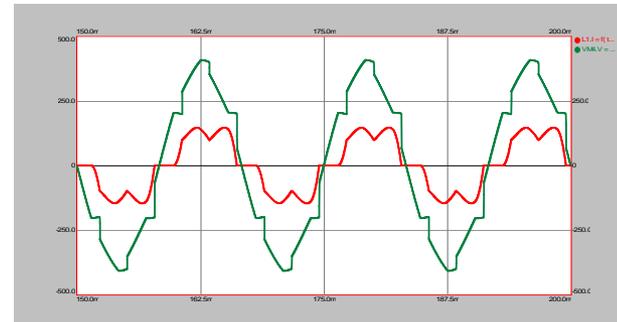
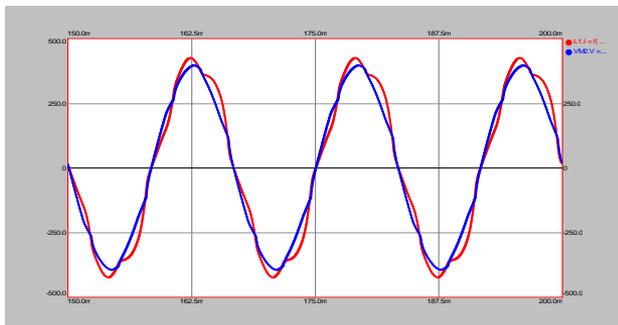


- Durch 3 teilbare Harmonische (3<sup>rd</sup>, 9<sup>th</sup>, etc) rotieren nicht → Nullsystem (3,6,9,12,15,...)
  - Summe der Ströme = 3x (!)



## 2. Messung von Strom- und Spannungsverzerrung

# Einfluss der Last auf THD Messung



THD<sub>i</sub> = 4.1%  
THD<sub>v</sub> = 4.1%

### 3. Funktionsweise aktiver harmonischer Filter

## Ansatz zur aktiven Kompensation von Oberschwingungen?

**Wechselrichter** zur  
gezielten Strom- oder  
Spannungseinprägung ins Netz  
**Aktives harmonisches Filter**



Kompensation von  
Oberschwingungen

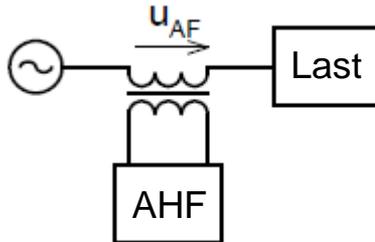
Kompensation von  
Blindleistung

Symmetrierung  
der Netzphasen

Flicker  
kompensation

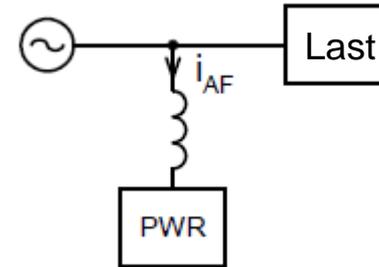
# Grundstrukturen aktiver harmonischer Filter

Anschluss in Reihe zur Last



- Anschluss in Reihe über Transformatorwicklung
  - direkte Beeinflussung der Spannung über der Reihewicklung
  - AHF = Spannungsquelle
- Pro:
  - direkte Spannungsbeeinflussung
  - Überbrückung von Spannungseinbrüchen möglich
- Contra:
  - Ankoppeltrafo erforderlich
  - aufwändige Installation
  - Nachrüstung schwierig
  - Skalierung aufwändig wegen Trafo
  - erhöhter Mess- und Regelaufwand

Paralleler Anschluss

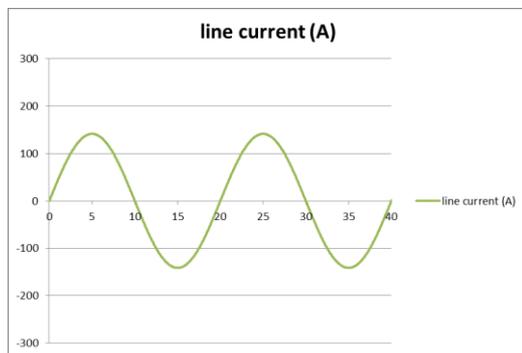
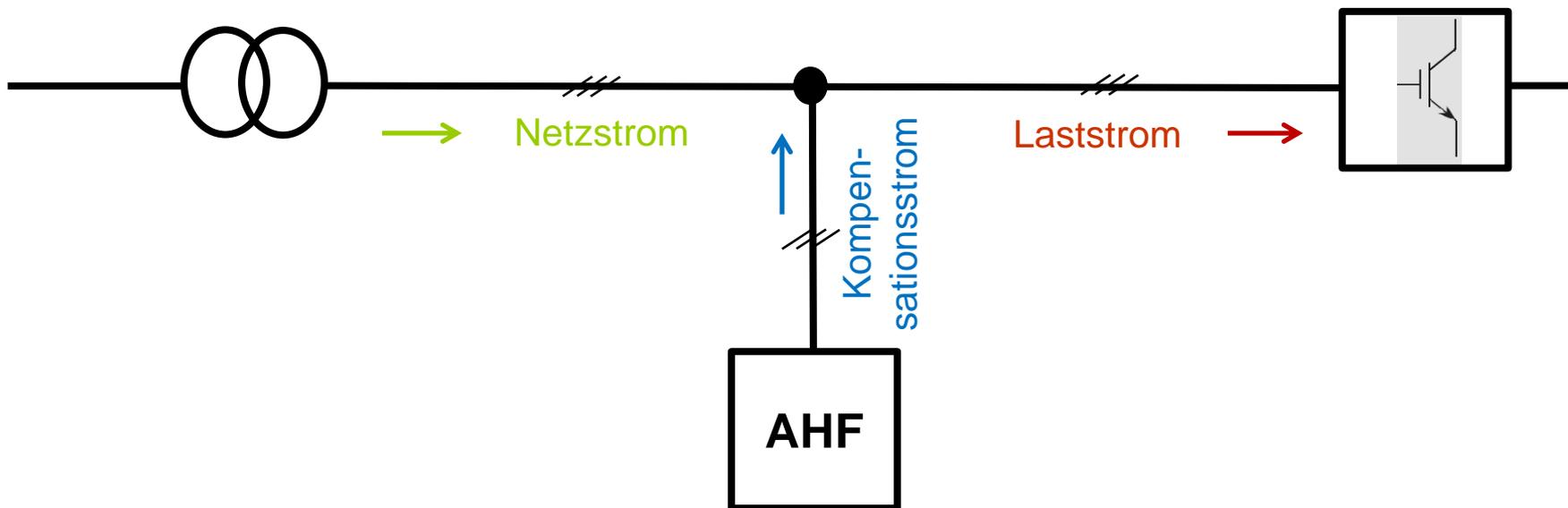


- paralleler Anschluss parallel zur Last, Netzdrossel
  - Stromeinprägung zur Eliminierung von Stromüberschwingungen
  - AHF = Stromquelle
- Pro:
  - einfache Messung des verzerrten Laststromes über Standardwandler
  - einfache Installation oder Nachrüstung
  - einfache Skalierbarkeit
- Contra:
  - Spannungsbeeinflussung nur indirekt
  - keine Überbrückung von Spannungseinbrüchen möglich



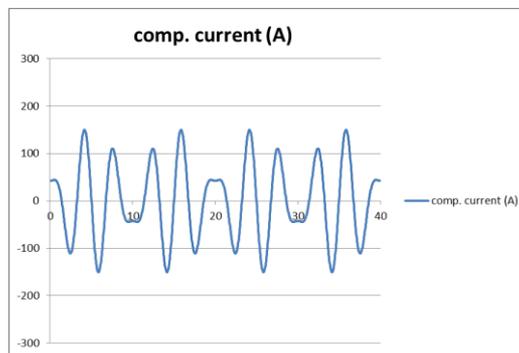
übliche AHF-Lösung

# Funktionsweise des AHF (Parallelankopplung)



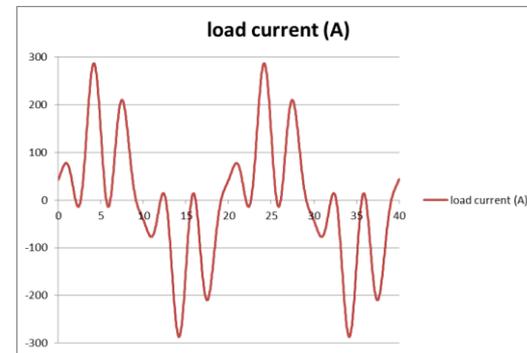
Netzstrom

+



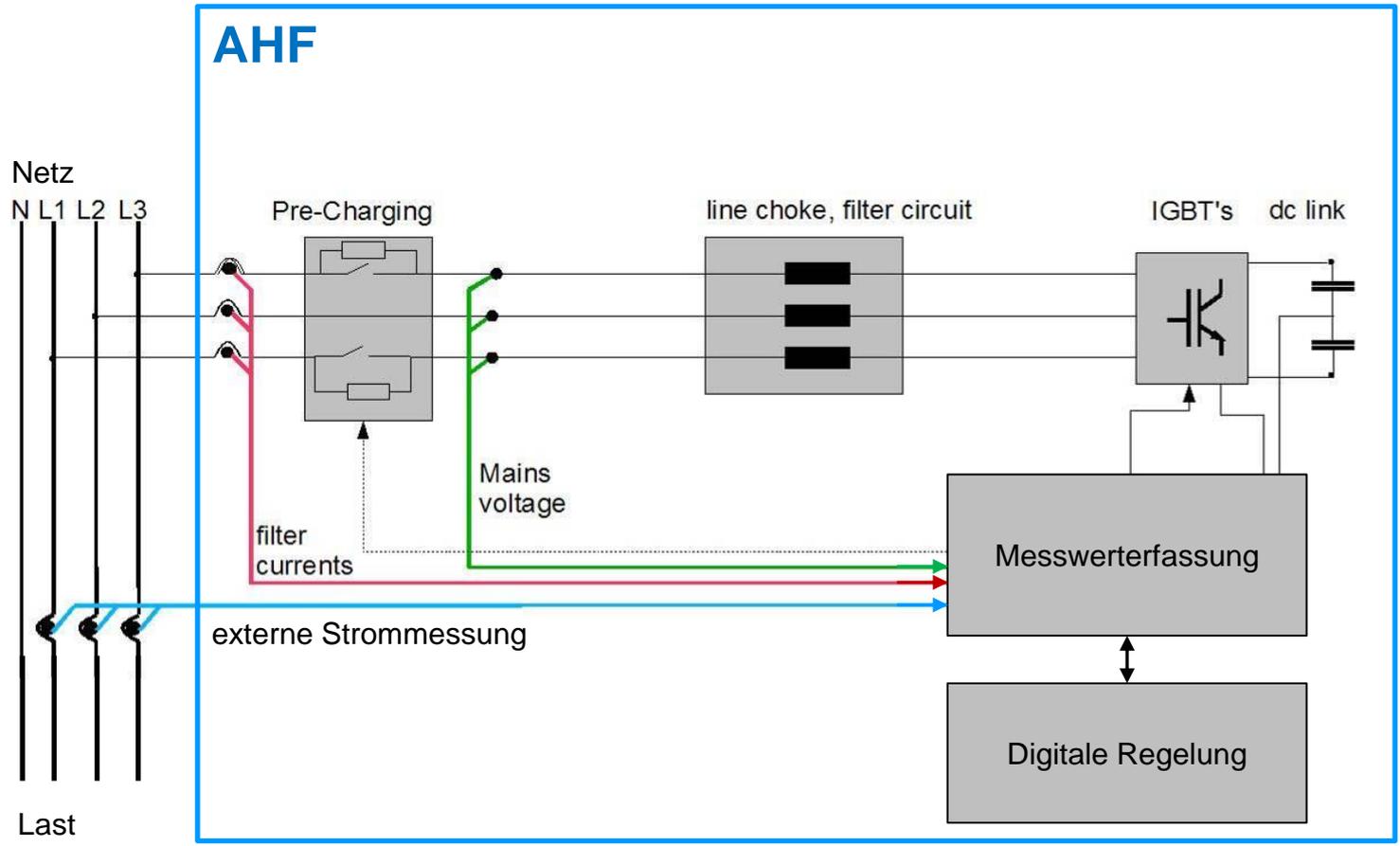
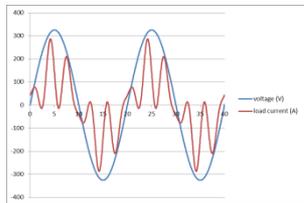
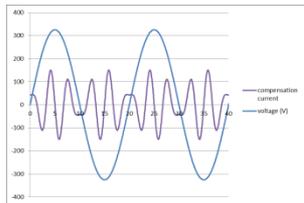
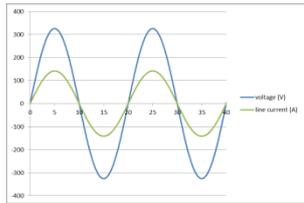
Kompensationsstrom

=

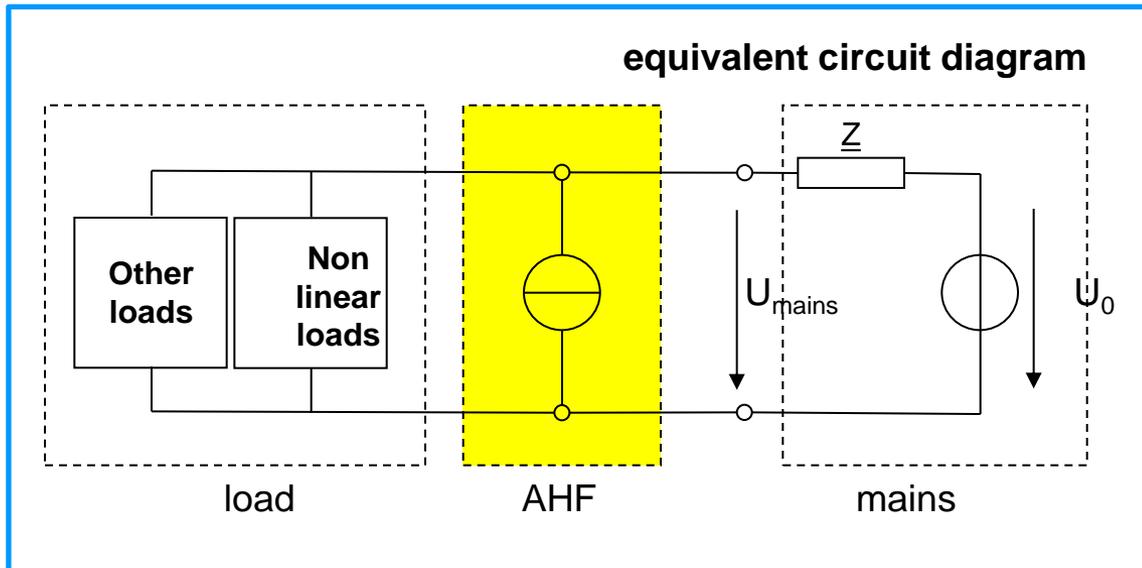


Laststrom

# Realisierung



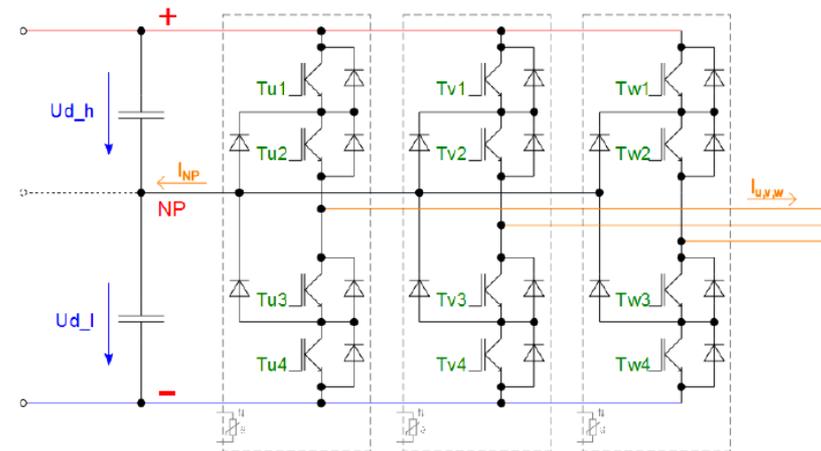
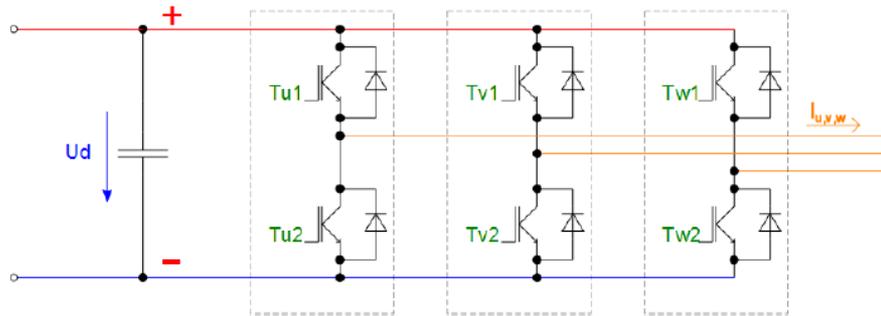
# Ersatzschaltbild



## ▪ Aktives harmonisches Filter

- arbeitet als Stromquelle
- verändert dadurch die wirksame Netzimpedanz am Anschlusspunkt
- speist Grundschwingungs-Blindströme (50Hz) und Oberschwingungs-Blindströme (150Hz, 250 Hz, ...) ins Netz ein
- ermöglicht aktive Wirkleistungs-Symmetrierung zwischen den Phasen
- puffert keine Wirkleistung (und ist damit keine USV)

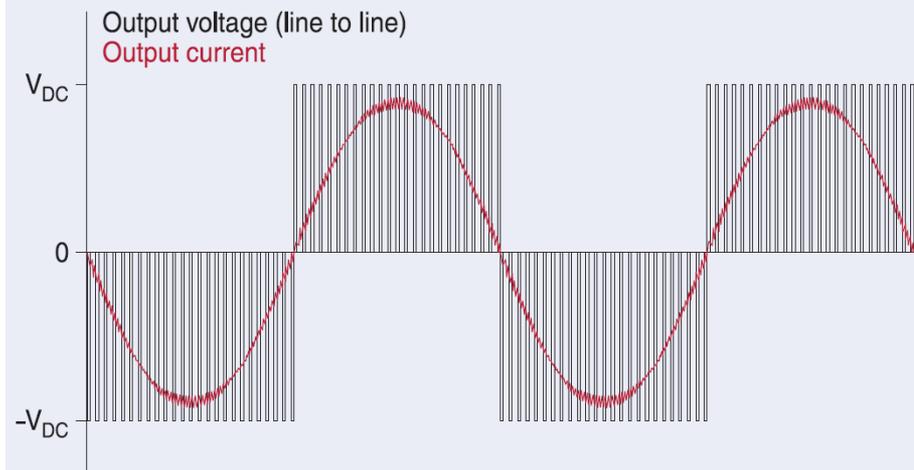
# AHF Leistungsteile - Ausprägungsformen



- Pro:
  - klassische Inverterschaltung im Niederspannungsbereich
  - erprobte Schaltungen und PWM Algorithmen
  - geringe Anzahl an Halbleitern (IGBT) erforderlich
  - Vielzahl von preiswerten Komponenten auf dem Markt verfügbar
- Contra:
  - IGBT mit höherer Sperrspannung erforderlich (z.B. 1200V)
  - höhere Welligkeit des Ausgangsstroms
- Pro:
  - Reduktion der Welligkeit des Ausgangsstroms
  - IGBT mit geringerer Sperrspannung erforderlich (z.B. 650V) → Reduktion der Schaltverluste
  - höhere Taktfrequenzen möglich
  - Verringerung des passiven Filteraufwands
- Contra:
  - komplexe Schaltung und PWM Algorithmen
  - höhere Anzahl an Leistungshalbleitern erforderlich
  - begrenzte Anzahl von Komponenten auf dem Markt verfügbar

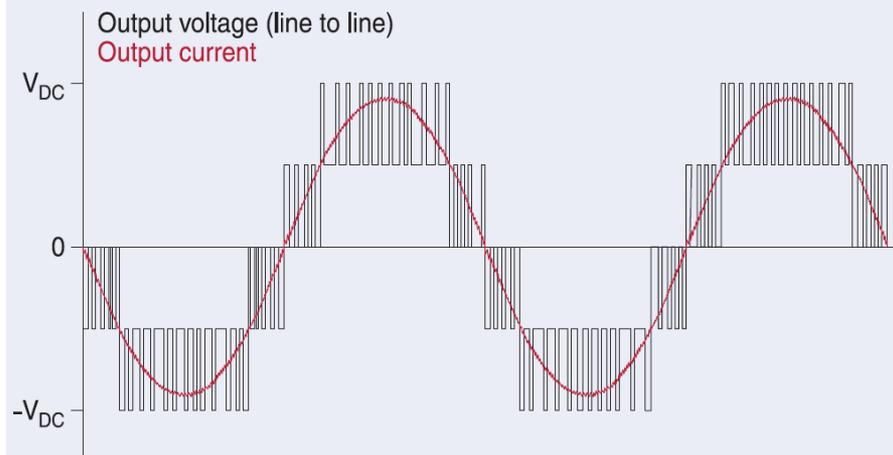
## Vergleich der AHF Leistungsteile 2-Level - vs. 3-Level

Current and switched output voltage for a two-level topology:



source: EPCOS AG

Current and switched output voltage for a three-level NPC topology:

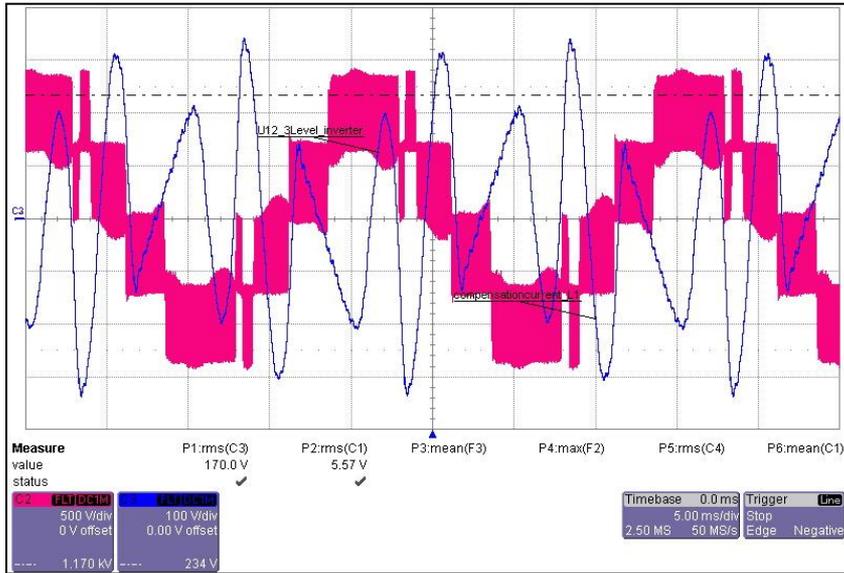


Zunehmende Verfügbarkeit von kostengünstigen 3-Level-Modulen und damit einhergehende Preisreduktion

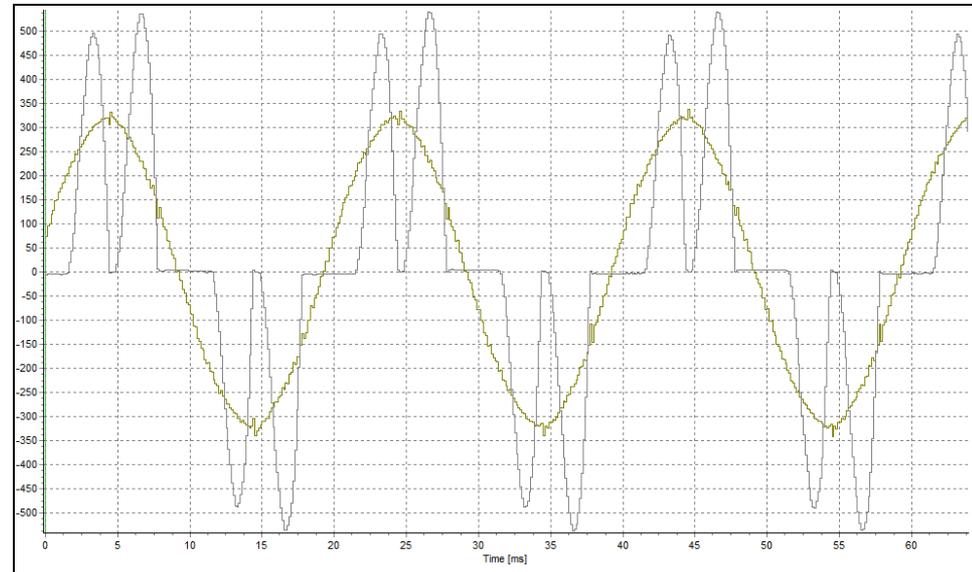


Vorteile der 3-Level-Topologie überwiegen im Gesamtsystem technisch und preislich

# Beispielmessung (690V Netz, 3-Level Topologie)



3-Level Ausgangsspannung (vor Filter) und Ausgangsstrom

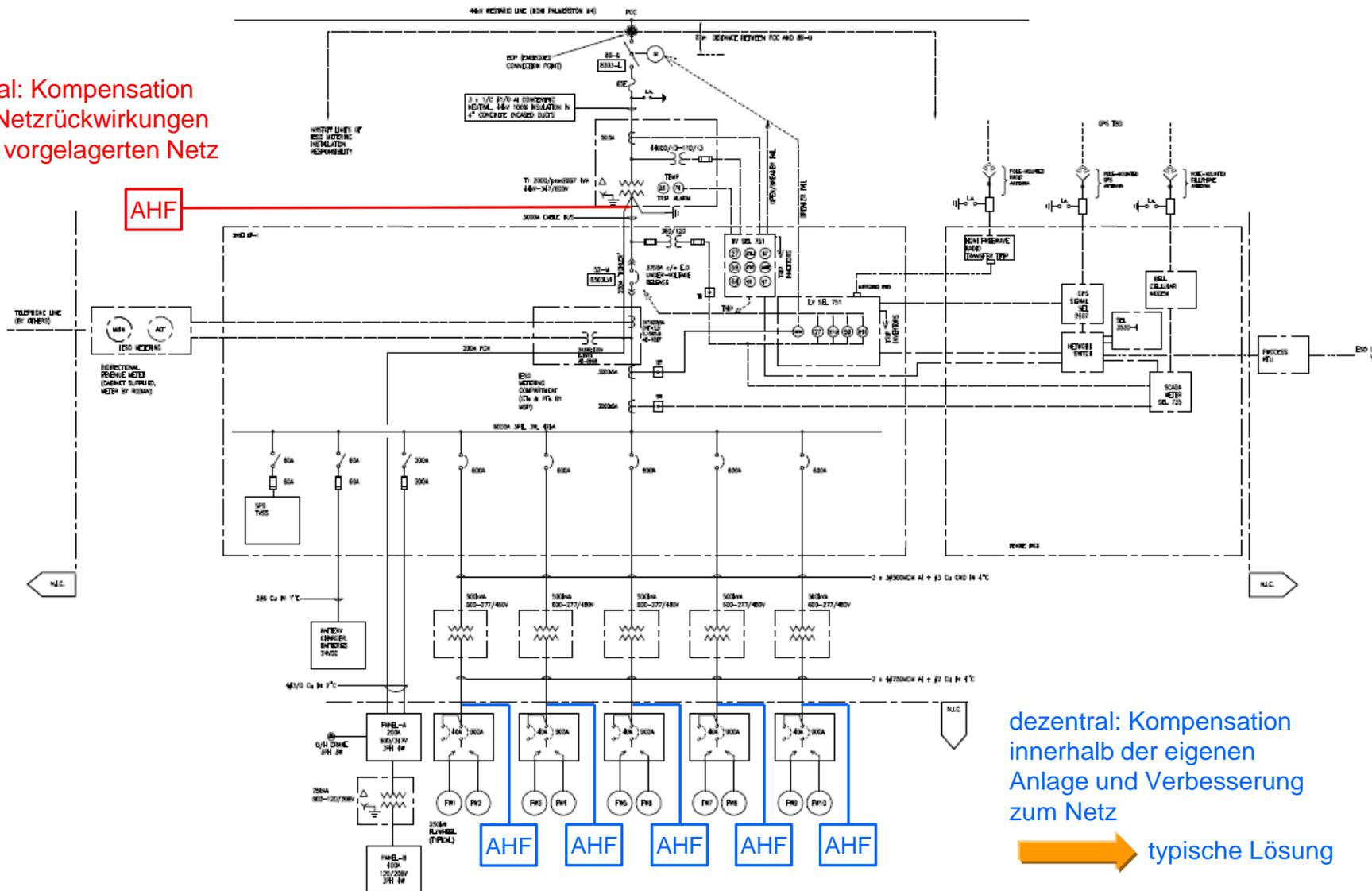


Laststrom und kompensierter Netzstrom

## 4. Dimensionierung und Auslegung aktiver Filter

# Globale Kompensation vs. dezentraler Kompensation

global: Kompensation der Netzurückwirkungen zum vorgelagerten Netz

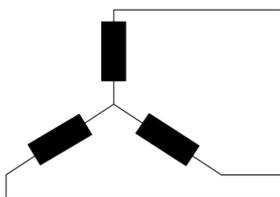


dezentral: Kompensation innerhalb der eigenen Anlage und Verbesserung zum Netz

➔ typische Lösung

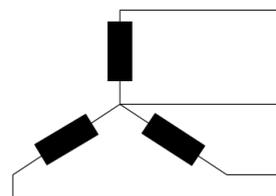
## Auswahl des richtigen AHF Typs

3-phasige Lasten ohne Neutralleiter  
(z.B. Frequenzumrichter)



3-Leiter AHF (ohne Neutralleiter-Kompensation)

3-phasige Lasten mit Neutralleiter-Anschluss oder 1-phasige Lasten  
(Beleuchtung, Computer, Netzteile, ...)

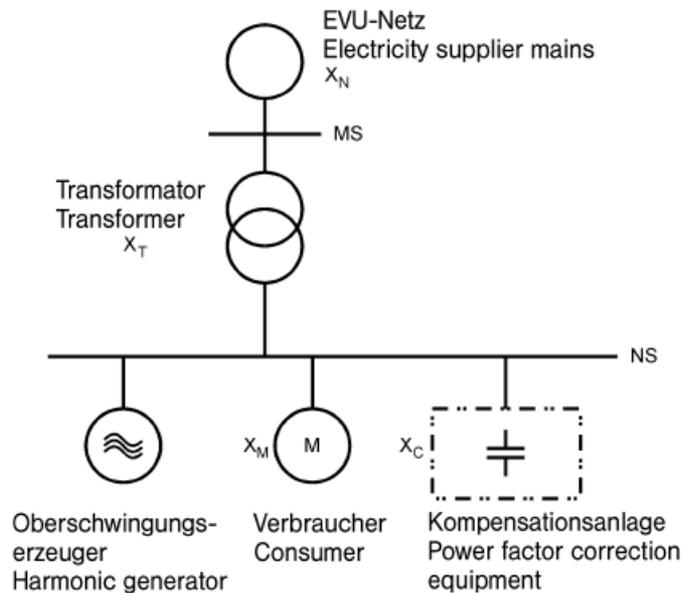


Christa Nöhren / pixelio.de

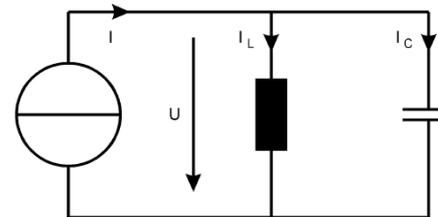


4-Leiter AHF (mit Neutralleiter-Kompensation)

# Überprüfung auf unverdrosselte Kompensationsanlagen



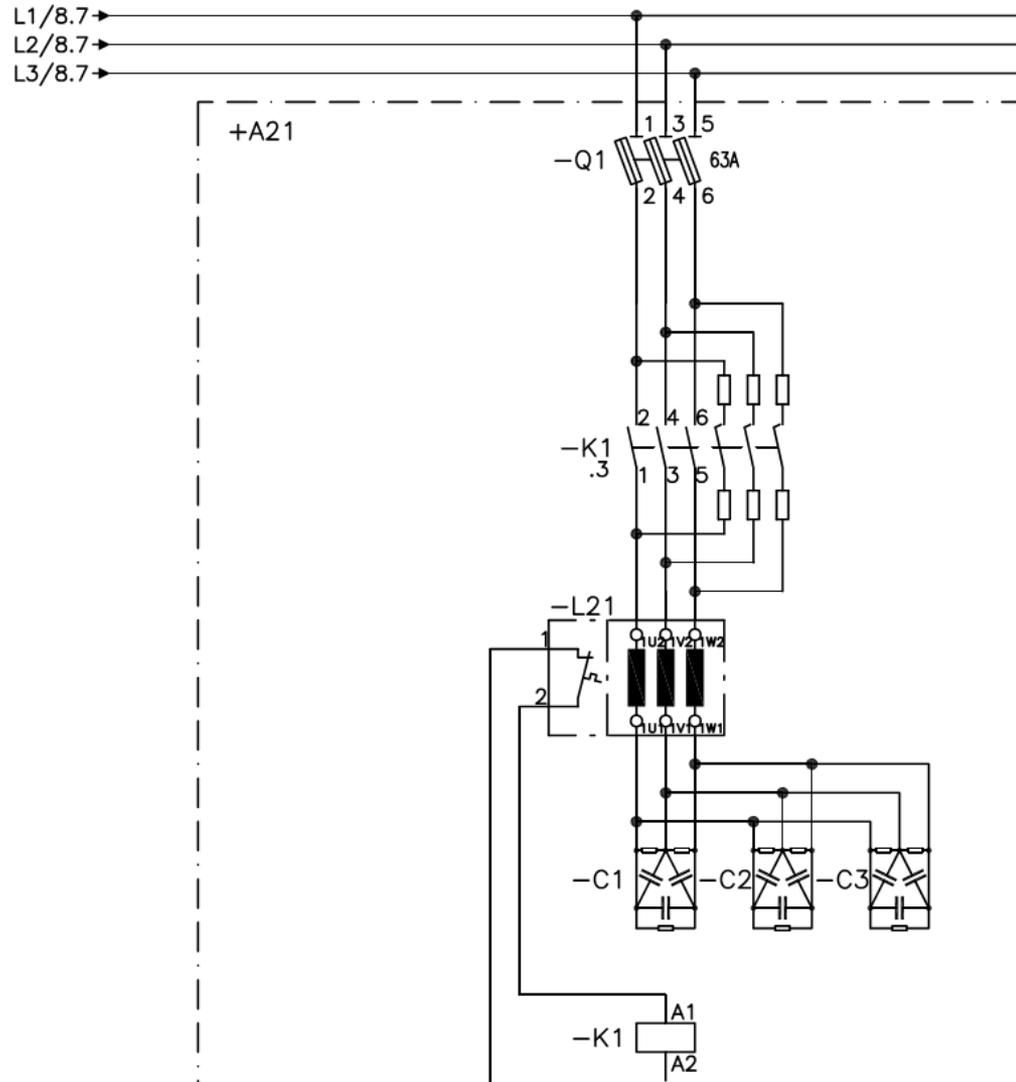
Parallel-Schwingkreis



- neu installierte Blindleistungskompensations-Anlagen sollten auf Grund des immer stärkeren Einsatzes von Leistungselektronik immer verdrosselt ausgeführt werden
- Ansonsten Gefahr der Anregung von Resonanzstellen durch Leistungselektronik

**AHF nicht in Netzen mit unverdrosselten Kompensationsanlagen betreiben!**

# Verdrosselung Kondensatorbank



**Switch**

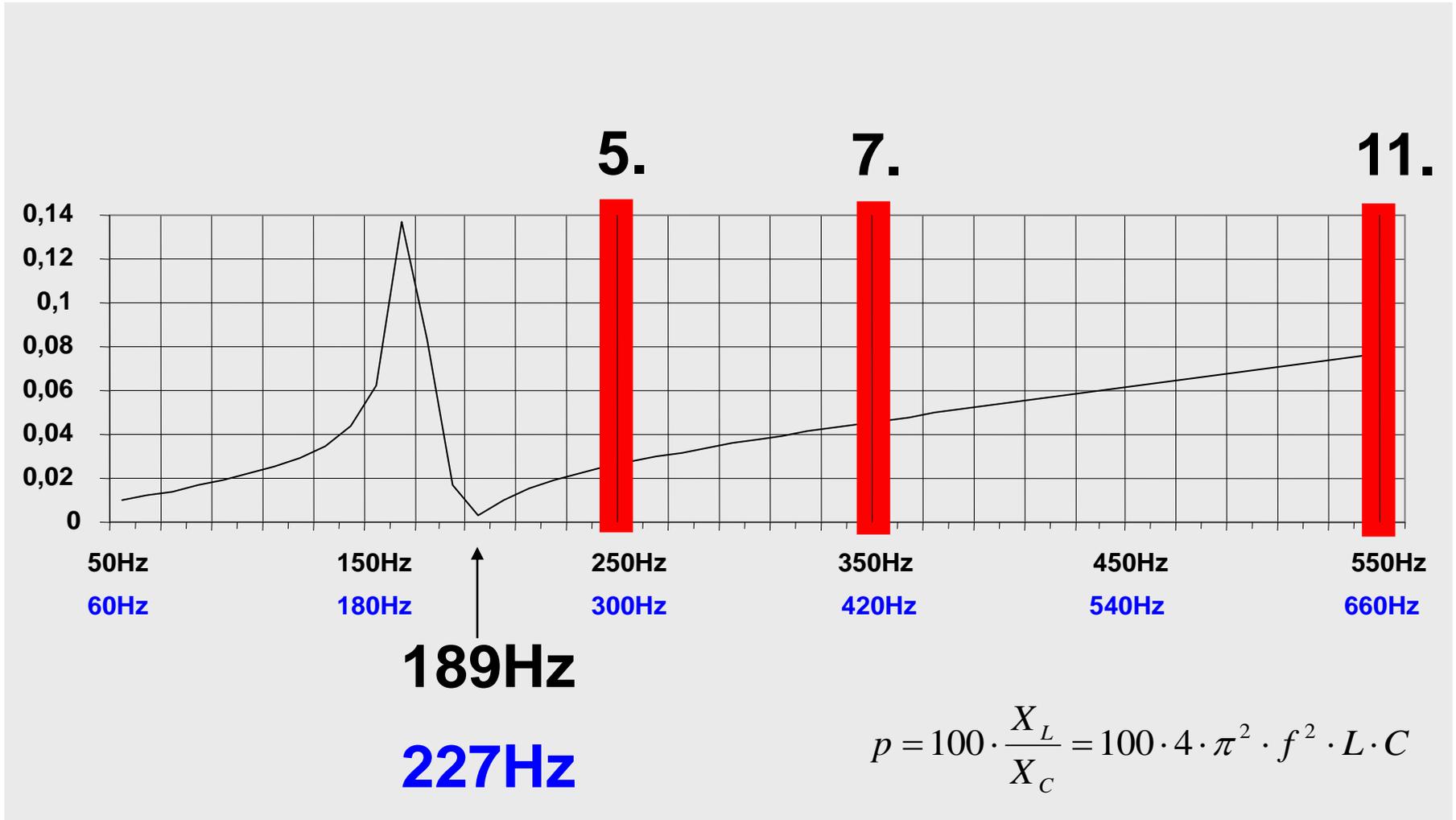


**Choke (L)**



**Capacity (C)**

## Beispiel für verdrosselte Kompensationsanlage (p = 7%)



# Resonanzfrequenz Beispiel

unverdrosselte Kompensationsanlage

$$f_r = f_n \sqrt{\frac{S_{Tr}}{Q_c \times u_k}}$$

where:  $S_{Tr}$  the transformer power  
 $u_k$  the relative short-circuit voltage of the transformer  
 $Q_c$  the compensation power  
 $f_n$  the mains frequency

Example:  $S_{Tr} = 630 \text{ kVA}$   
 $u_k = 6\%$   
 $Q_c = 250 \text{ kvar}$  in increments of 50 kvar  
 $f_n = 50 \text{ Hz}$

Capacitor power	Resonant frequency
50	724
100	512
150	418
200	362
250	324
300	295



Resonanzfrequenz ist zu nah an den typischen Oberschwingungen (150Hz, 250Hz, 350 Hz, ...)

verdrosselte Kompensationsanlage

$$f_{res} = \frac{f_n}{\sqrt{p/100}}$$

$f_n$  the mains frequency  
 $p$  the choking factor

$p$  (in %) =  $X_L / X_C$   
 oder

$X_L$  the reactance of the choke  
 $X_C$  the reactance of the capacitor

$p$  (in %) =  $100 \times (f_n / f_{res})^2$

$f_n$  the mains frequency  
 $f_{res}$  the resonant frequency of the resonant circuit

A selection of values:

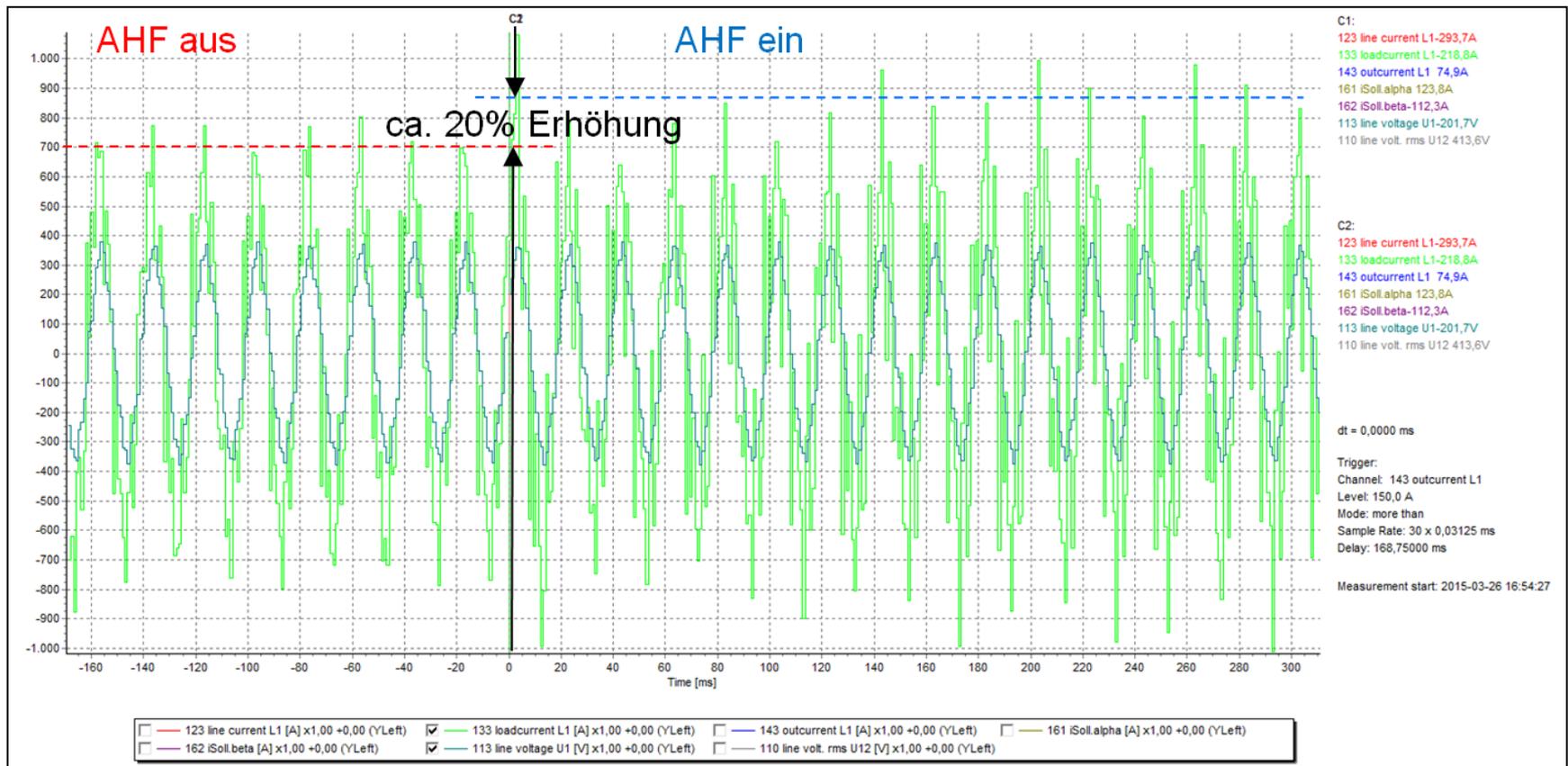
$p$ in %	$f_{res}$ in Hz
5,5	214
7	189
8	176
12,5	141
14	134



Resonanzfrequenz sollte kleiner als die kleinste auftretende Harmonische sein (150Hz oder 250Hz)

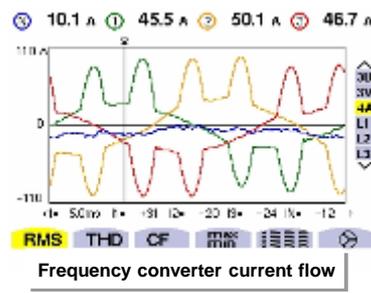
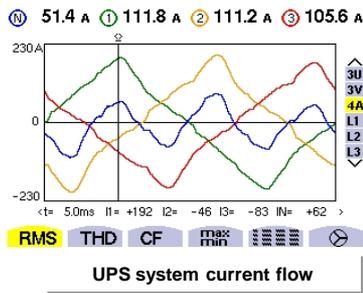
## AHF verändert Netzimpedanz - Laststromerhöhung

- Laststromerhöhung durch aktives Filter
  - abhängig von Netzimpedanz und Verdrosselung der Lasten
  - typische Erhöhung 5% .. 20%, in Einzelfällen auch deutlich mehr (...100%)



# Auslegung eines aktiven Filters (harmonische Kompensation)

- Exakte Auslegung durch **Netzanalyse** (Messung der Ströme und Ermittlung der Verzerrung  $THD_i$ )
- Beispiel:
  - Frequenzumrichter 100kW
  - Nennstrom ca. 150A
  - gemessener  $THD_i = 40\%$
  - Ziel  $THD_i = 5\%$
- Kompensationsstrom  $150A * (40\% - 5\%) = 52,5 A$
- plus Reserve: 10..20% → **60A AHF**
- Dimensionierung durch **Abschätzung**
  - Ziel  $THD_i = 5\%$
  - typische Last (Frequenzumrichter, B6 Brücke als Eingangsgleichrichter, Netzdrossel 3%)
- “Daumenregel”: Kompensationsstrom: **1/3** des Nennstromes (150A)
- Kompensationsstrom = 50A
- plus Reserve: 10..20% → **60A AHF**



empfohlene Vorgehensweise

nur für typische Lasten möglich

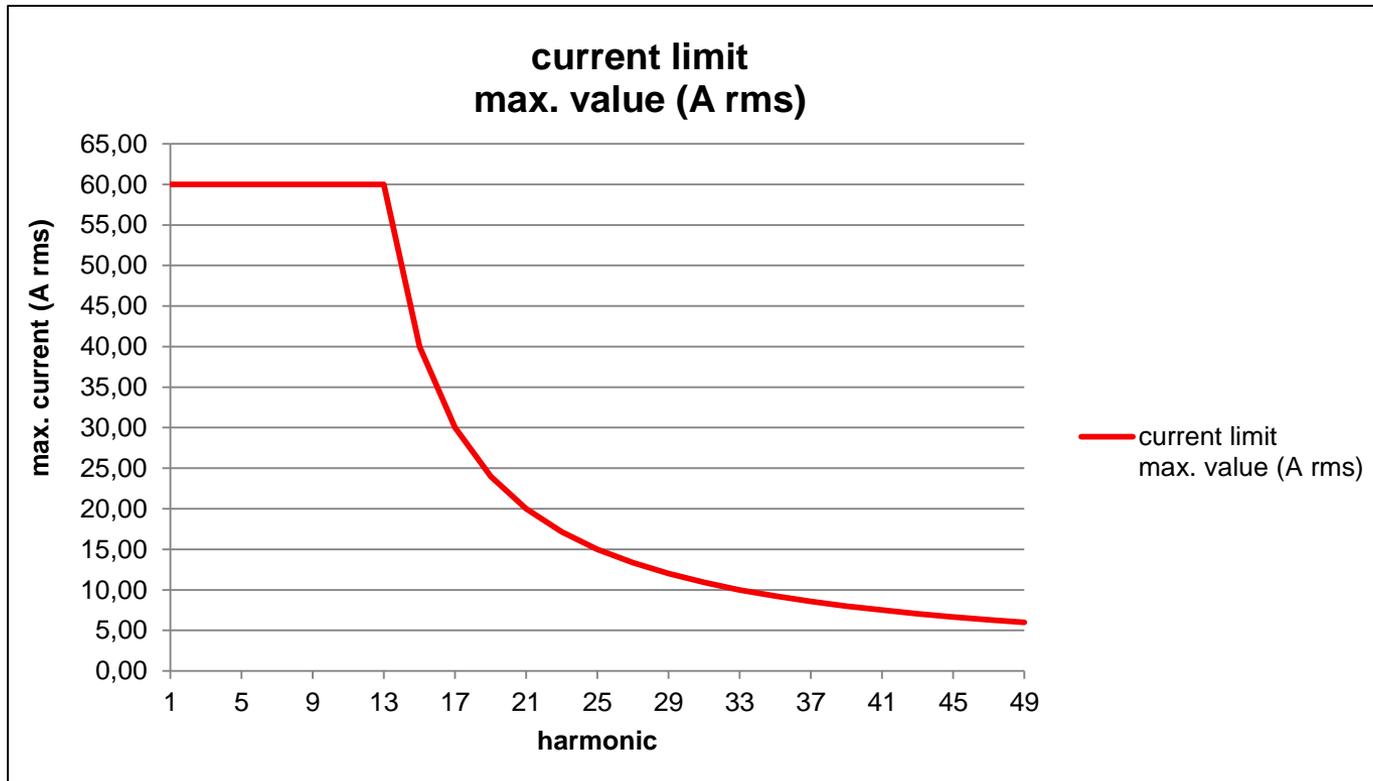
## Auslegung eines AHF (Blindstromkompensation)

- Ermittlung der benötigten Blindleistung
  - Berücksichtigung der Netzspannung
  
- Beispiel:  $100 \text{ kvar} = 400\text{V} * 250\text{A} \rightarrow 300\text{A}$  Gerät erforderlich
  
- Vorteile Blindstromkompensation mit AHF
  - geringste Reaktionszeiten
  - Kompensation stark veränderlicher Lasten
  - geringe Wartungskosten
  
- Nachteile Blindstromkompensation mit AHF
  - höhere Investitionskosten

Wirtschaftlichkeit der Lösung betrachten!

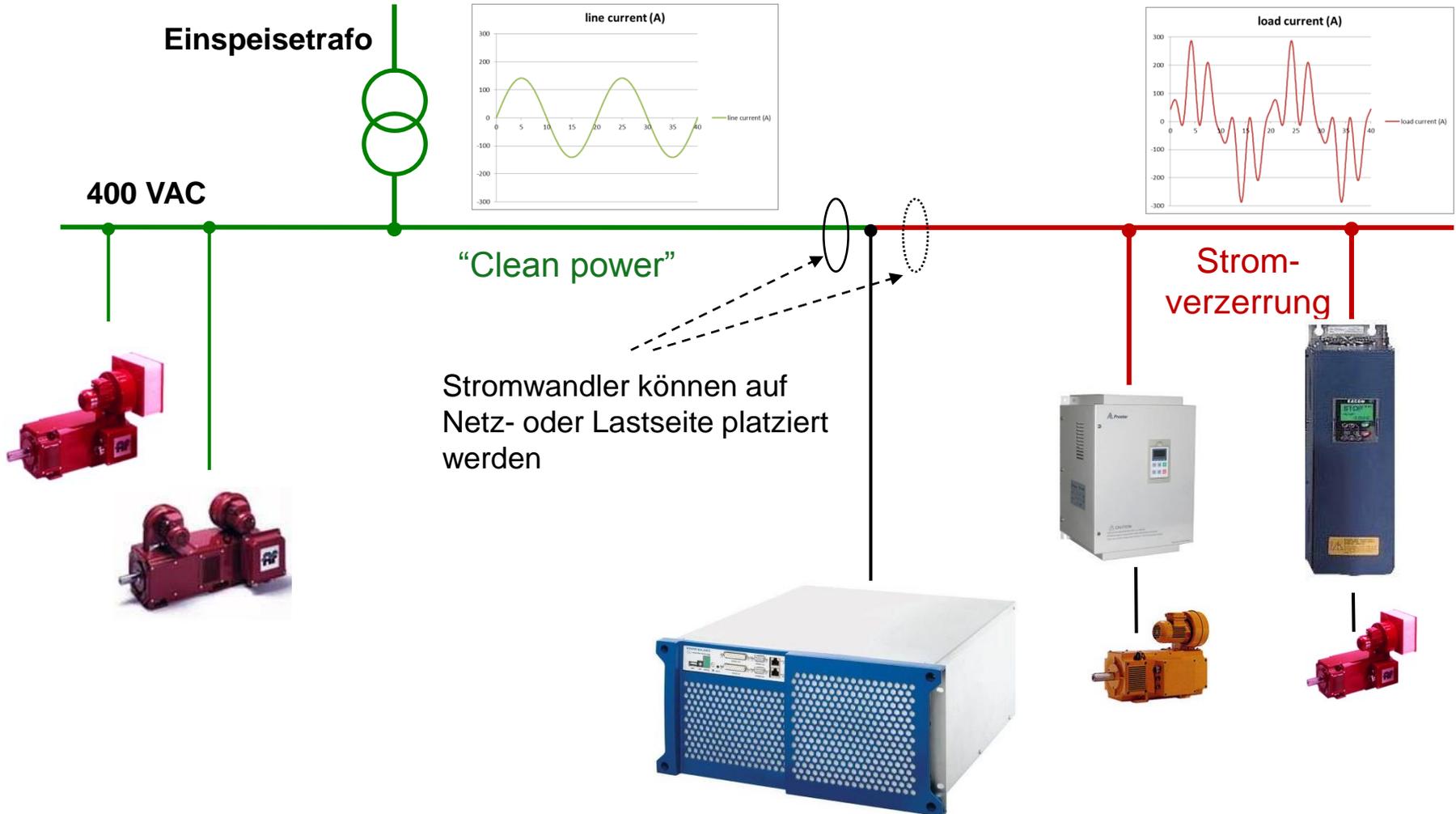
## Typische Grenzkennlinien AHF - Beispiel

- Nennstrom 60A (rms)

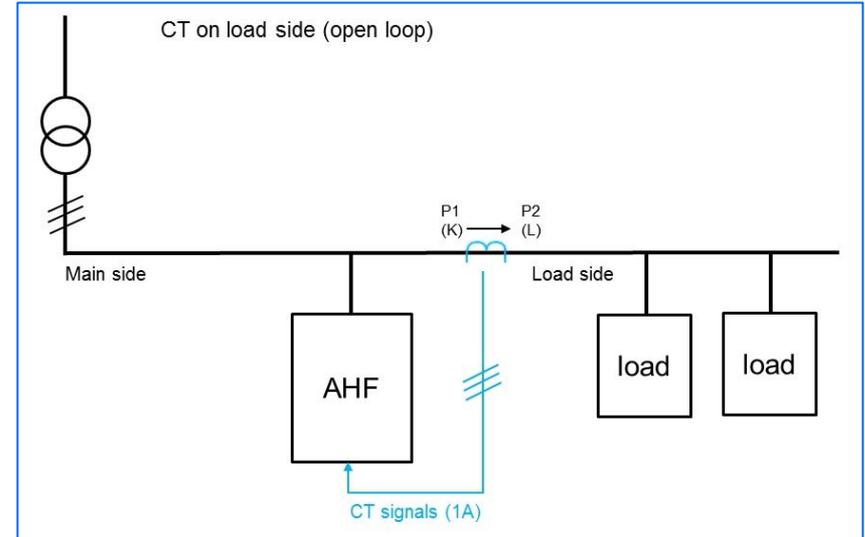
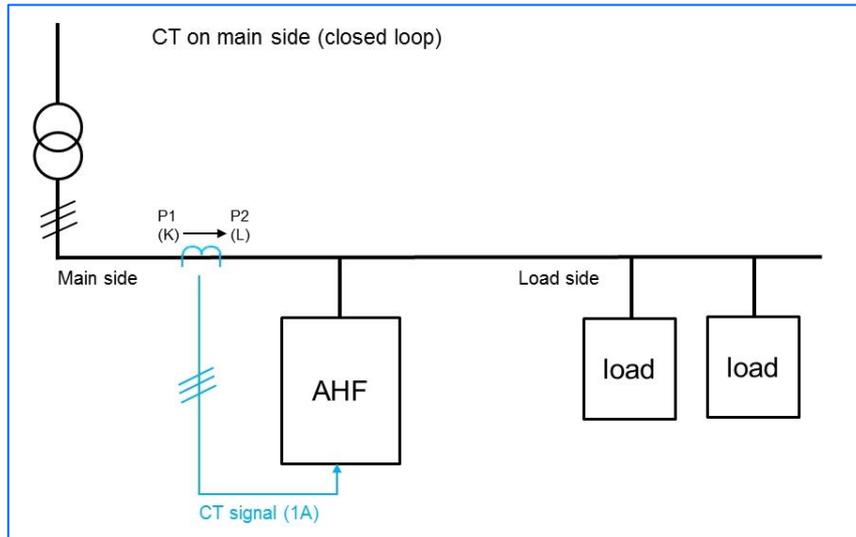


- Grenzkennlinie orientiert sich am typischen Oberschwingungsspektrum von Leistungselektronik
- Nennstrom ist nicht für alle Frequenzen erforderlich

# Anschlusspunkt und Position der Stromwandler festlegen



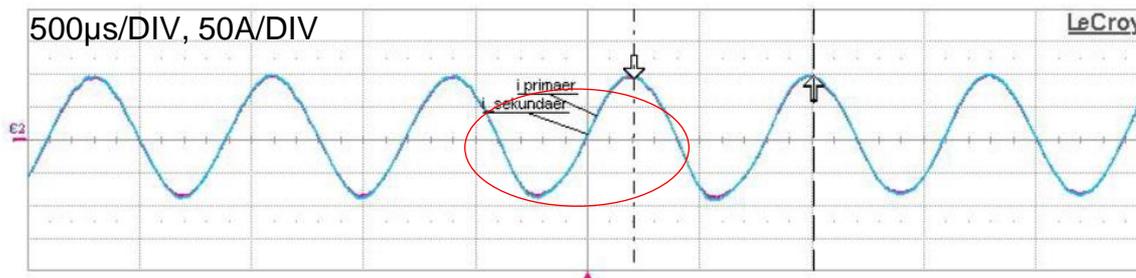
## Festlegung der Stromwandlerposition (Lastseite, Netzseite)



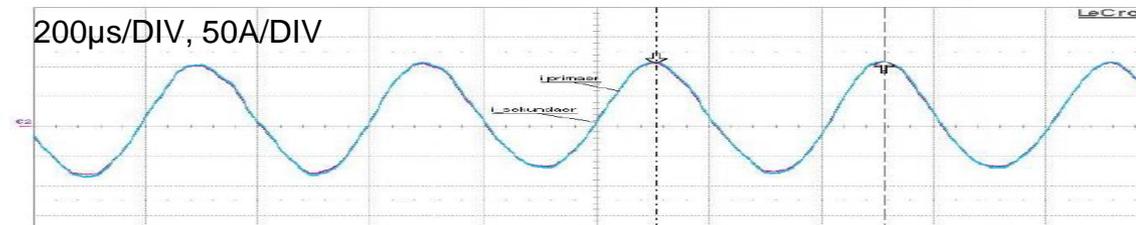
- Abhängig von
  - verfügbarem Platz in der NSHV
  - freier Abgang als Anschlussmöglichkeit für AHF
- Kompensationsergebnisse für Messung auf Last- oder Netzseite unterscheiden sich in der Praxis kaum

## Messung der realen Phasenverschiebung eines Stromwandlers bei höheren Frequenzen

- Messung
  - handelsüblicher 50Hz-Stromwandler 500 : 5A
  - Aufzeichnung Primärstrom (blau) und Sekundärstrom (rot)



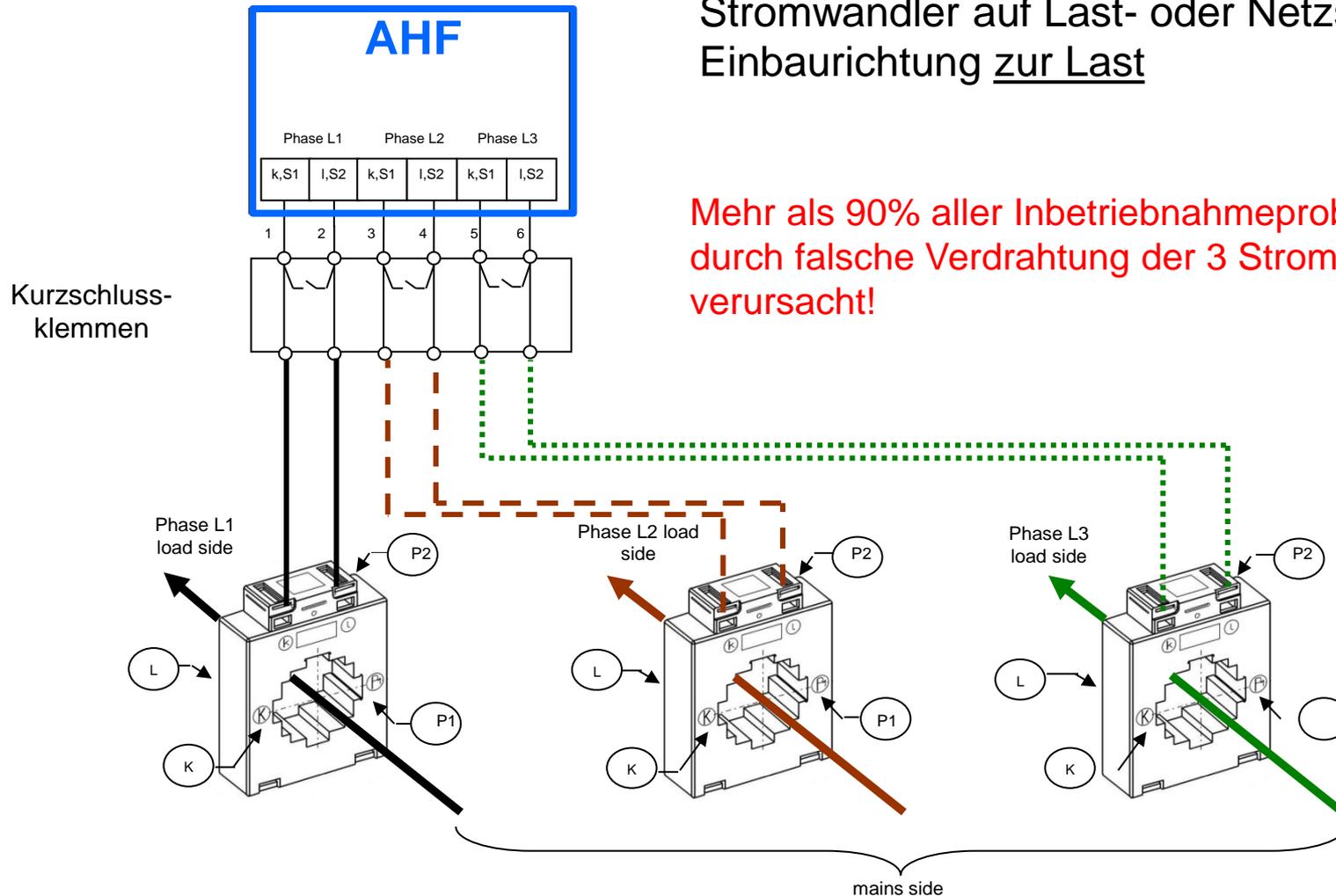
- 1250 Hz (25. Harmonische)
- 90A peak



- 2450 Hz (49. Harmonische)
- 90A peak

- Ergebnis
  - Für Ströme  $\ll$  Nennstrom (hier: 500A) tritt keine signifikante Phasen und Amplitudenverfälschung auf
  - Harmonische nehmen mit steigender Frequenz typischerweise ab  $\rightarrow$  Standard-Stromwandler können für AHF verwendet werden

# Stromwandler Anschluss



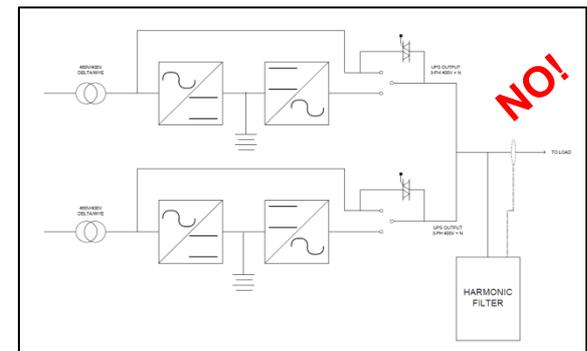
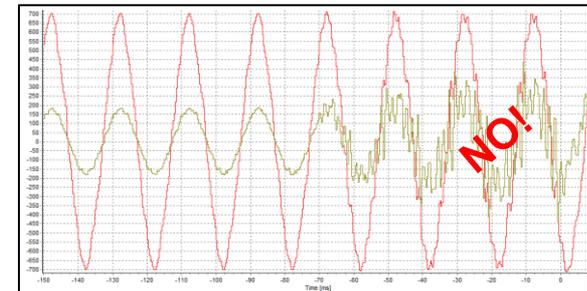
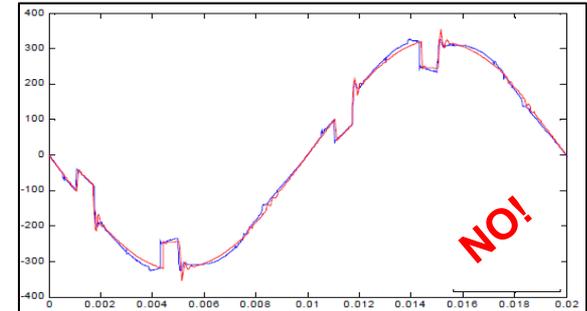
Stromwandler auf Last- oder Netzseite, Einbaurichtung zur Last

Mehr als 90% aller Inbetriebnahmeprobleme sind durch falsche Verdrahtung der 3 Stromwandler verursacht!

## 5. Stand der Technik

# AHF: Einsatzgrenzen

- Kompensation von Kommutierungseinbrüchen
  - keine signifikante Verbesserung mit AHF möglich
  - „Absaugung“ mit Kondensator oder Kommutierungsdrossel im Stromrichter erforderlich
  - Ursache muss bekämpft werden
  
- Netzresonanzen
  - Die Resonanz existiert unabhängig vom AHF, sie kann mit diesem nicht behoben werden
  - Ein AHF kann aber die anregende Leistungselektronik dämpfen, so dass diese eine Resonanz nicht mehr anregen kann
  
- Kompensation am Ausgang einer USV
  - USV Ausgang ist geregelt und synchronisiert zu den anderen USV Modulen
  - Regelungen von AHF und USV arbeiten „gegeneinander“
  - kein AHF am USV Ausgang
  - Kompensation am Eingang ok

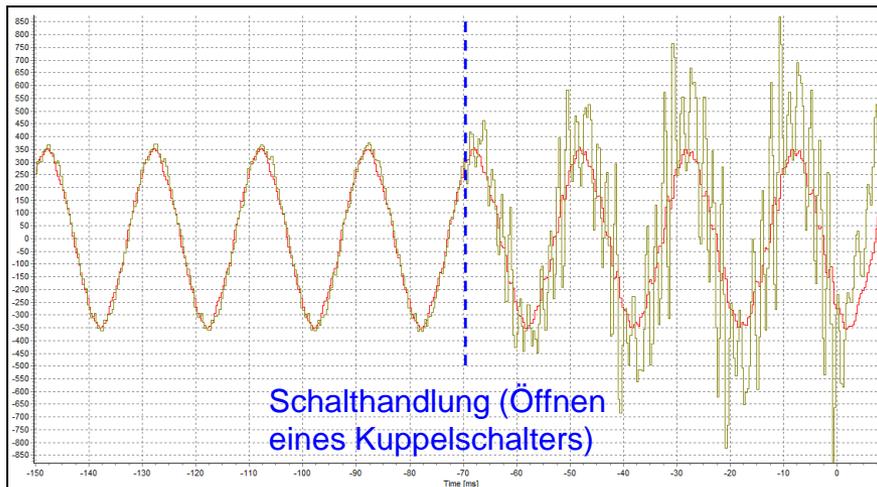


# Kenngrößen aktiver Filter – typische Werte Stand der Technik

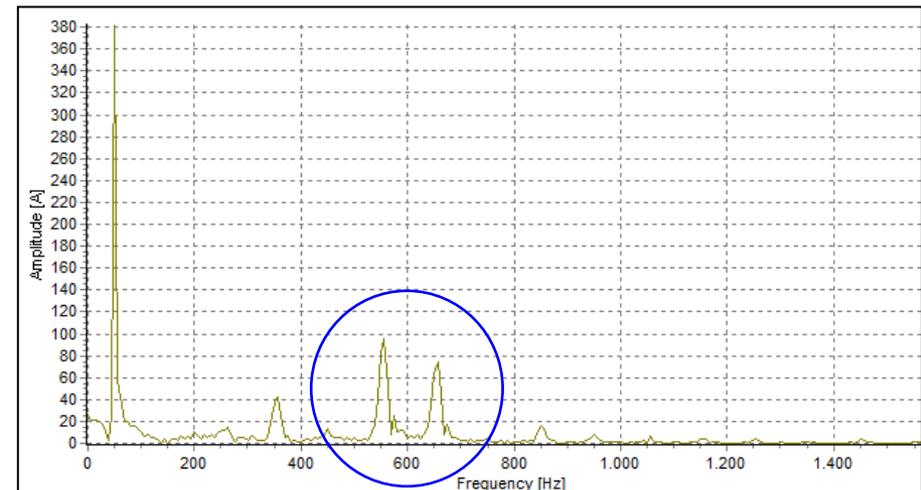
Eigenschaft	Beispielwert, Bedeutung
Schaltfrequenz	24kHz, Taktfrequenz des Leistungsteils
Regelfrequenz	48kHz, Frequenz der Regelschleife
Reaktionszeit	21µs, Maß für die Schnelligkeit des Filters (=1/Regelfrequenz)
Ausregelzeit	< 300µs, Zeit bis zur stationären Ausregelung eines Lastsprunges, sollte << halbe Netzperiode sein
Digitale Regelung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Selective Direct Control Algorithmus</b> (Einzelregelung von Harmonischen, deutlich schneller als klassische FFT)</li> <li>• Kompensation bis zur 49. Harmonischen</li> <li>• individuell einstellbare Kompensationsgrade je Harmonische</li> <li>• einstellbare Strombegrenzung für jede Harmonische</li> </ul>
Funktionen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Oberschwingungskompensation</li> <li>• Blindleistungskompensation, einstellbarer Leistungsfaktor</li> <li>• Blindstromeinprägung, Überkompensation</li> <li>• Wirkleistungs-Symmetrierung</li> <li>• Flicker-Kompensation durch Wirkleistungs-“Kompensation“ und Blindleistungskompensation</li> </ul>
Resonanzüberwachung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Resonanzerkennung, Vermeidung unkontrollierter Einspeisung in Resonanzstellen</li> <li>• Spannungsüberwachung</li> </ul>
Stromwandler	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Installation auf Netz- oder Lastseite, Parallelbetrieb mehrerer AHF möglich</li> </ul>

# AHF: Resonanzüberwachung

- Netzresonanzen
  - Resonanz bedingt durch Anlagenkonfiguration
  - können durch Schaltzustände geändert werden
- Anforderungen an AHF
  - Verhinderung der unkontrollierten Einspeisung in die Resonanzstelle
  - zeitlich unverzögerte Erkennung von Resonanzen
  - automatisches selektives Überwachen und Abschalten der betroffenen Harmonischen

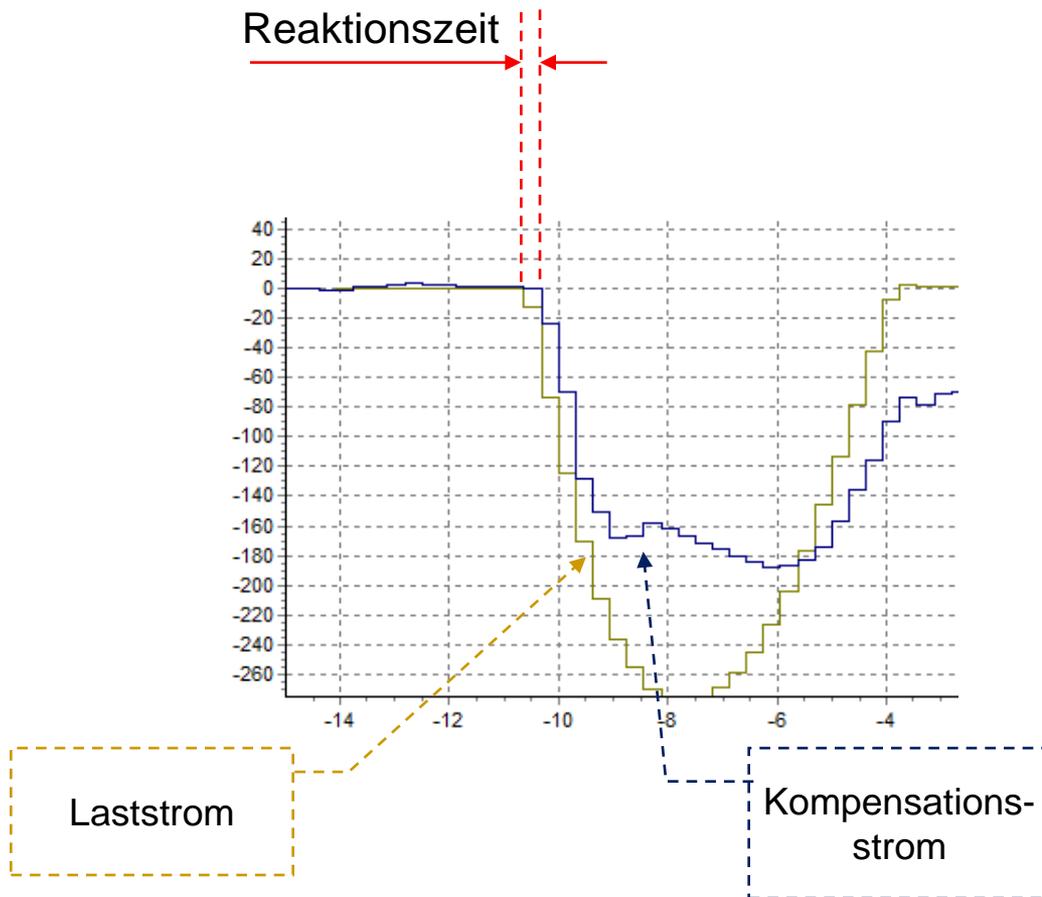


Schlagartiges Auftreten einer Resonanz nach Schalthandlung



Resonanzstellen bei 11. und 13. Harmonischen

## Reaktionszeit des AHF (reaction time)



## Reaktionszeit eines AHF

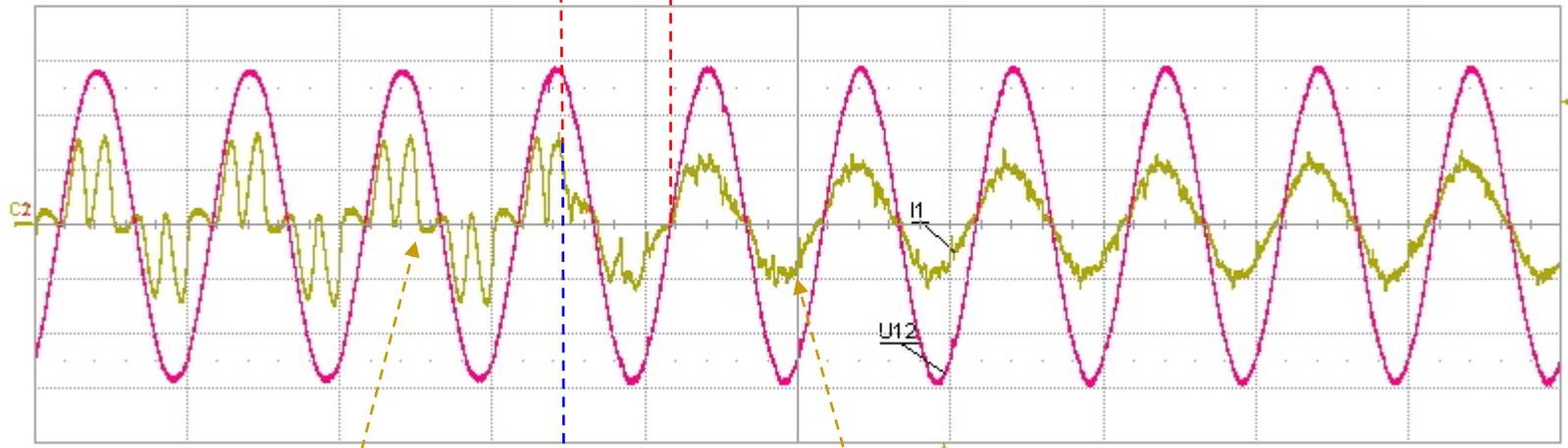
Zeit, nach der die erste Reaktion des AHF auf eine Laständerung erfolgt

# Ausregelzeit eines AHF (steady state response time)

Ausregelzeit

Ausregelzeit eines AHF

Zeit, nach der die stationäre Ausregelung der Störung erfolgt

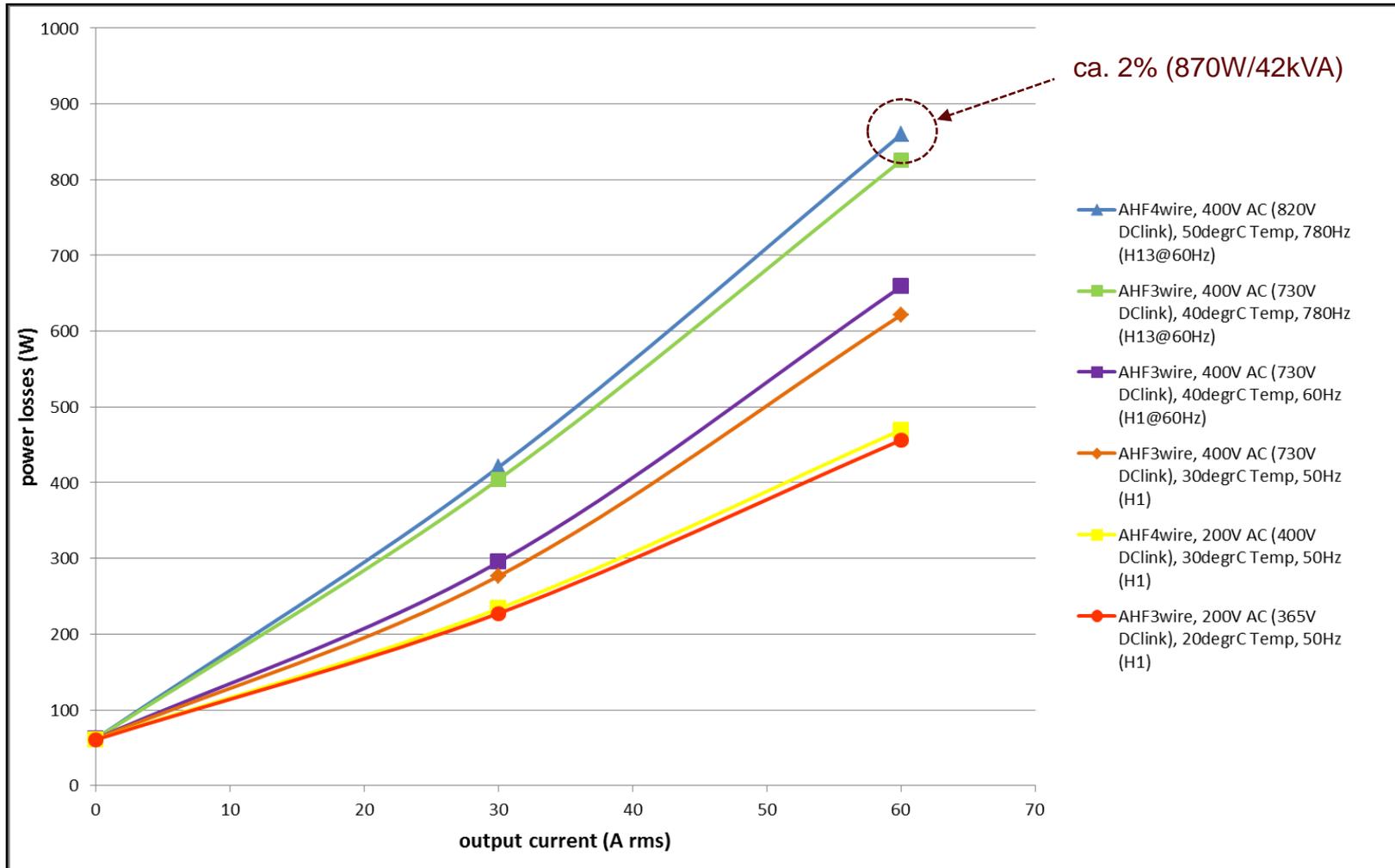


Laststrom (vor Kompensation)

Netzstrom (mit Kompensation)

Aktivierung des AHF

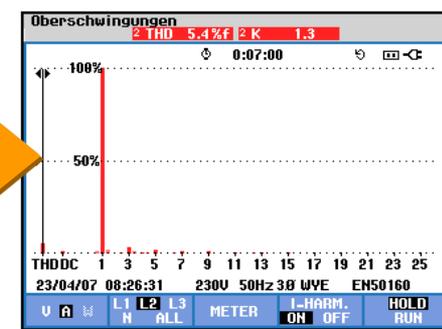
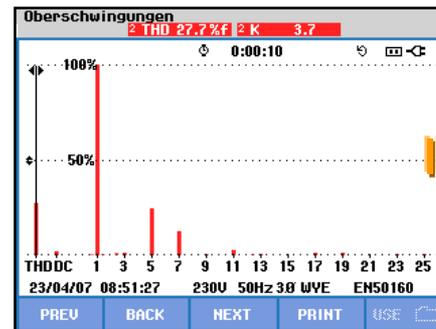
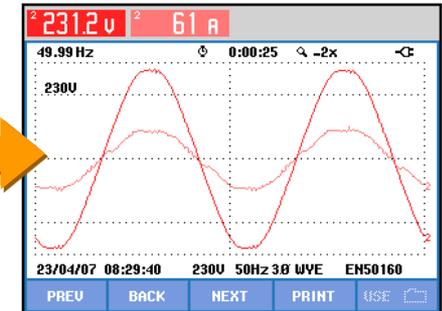
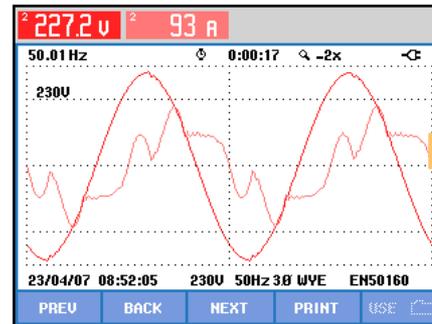
# Typische Verlustleistung eines AHF



Strom- und Arbeitspunktabhängige Verlustleistung (am Beispiel eines 60A Filters)

## 6. Anwendungsbeispiele

# Applikationsbeispiel Kläranlage



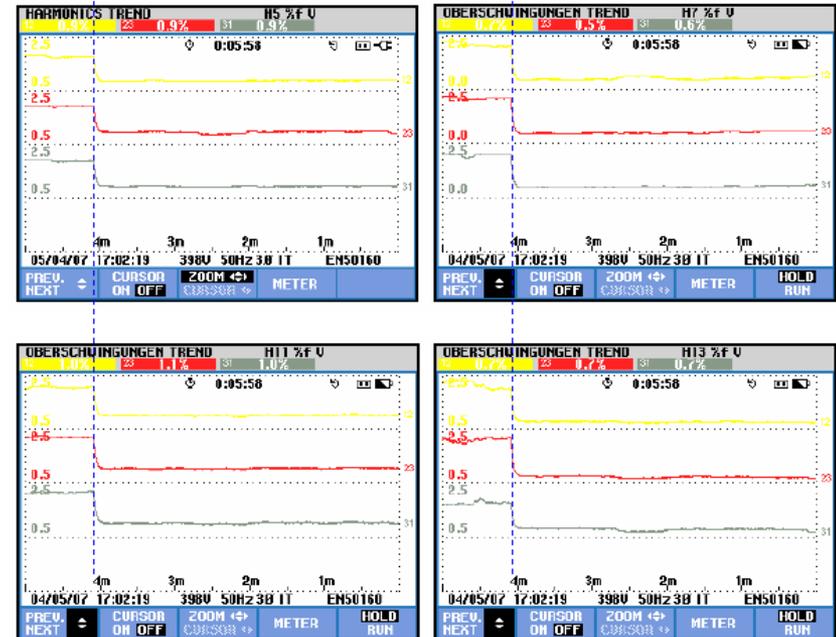
- Problem: störende Oberschwingungen, Störung der Leitsysteme, schnell veränderliche Blindleistung (Kosten!)
- Applikation: Kompensation von Oberschwingungen und Blindleistung
- Last: Drehstromantriebe direkt am Netz, Frequenzumrichter

# Applikationsbeispiel

## Stahlwerk: Stromversorgung einer UV Trocknungsanlage

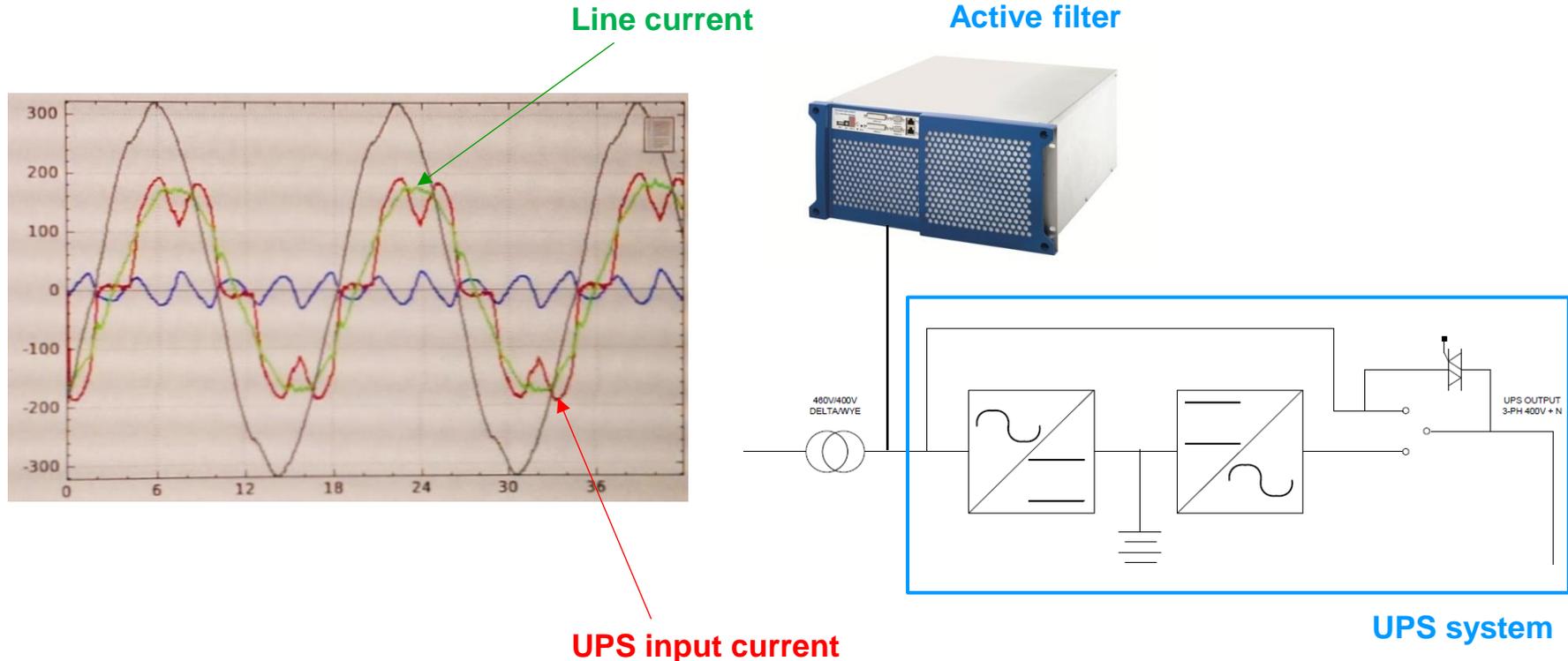


Aktivierung des AHF



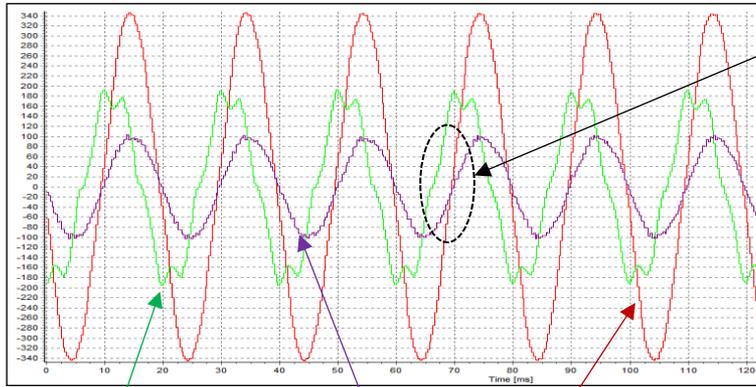
- Problem: Vorsorgliche Sicherstellung der Zuverlässigkeit der Anlage und der Leitsysteme (Feldbus)
- Applikation: Kompensation von Oberschwingungen und Blindleistung
- Last: 16 elektronische Vorschaltgeräte für UV-Lampen, ca. 550kW

## application - UPS system with input rectifier



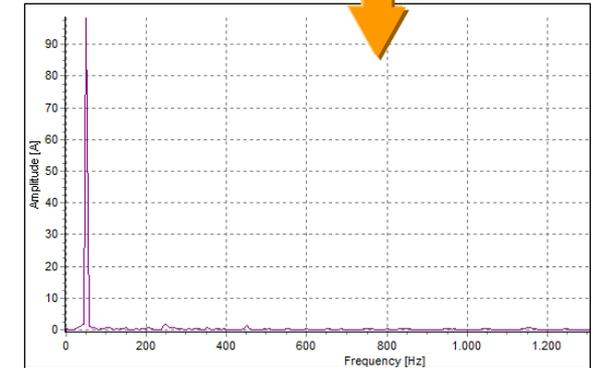
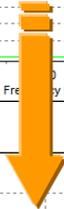
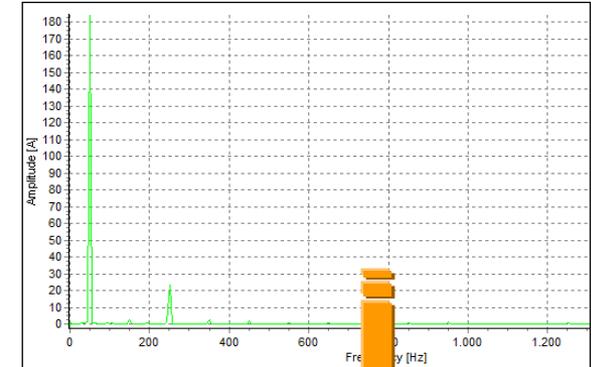
- **problem:** interference with the line monitoring of the UPS systems, unreliable operation
- **application:** compensation of harmonics and reactive power
- **load:** uncontrolled input rectifier with line choke 3%

# Applikationsbeispiel Karosserie-Rohbau (Automobilbauer)



Phase shift  
(capacitive)

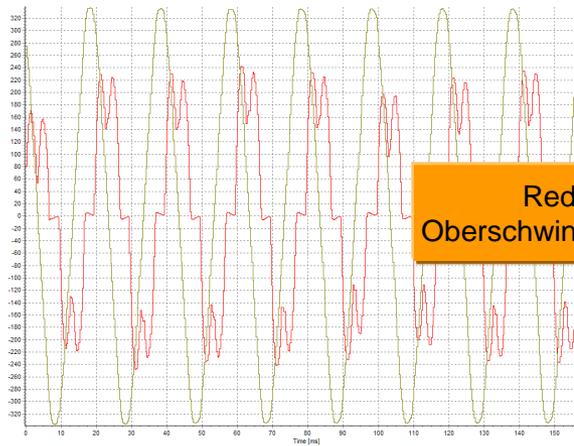
load current    line current    line voltage



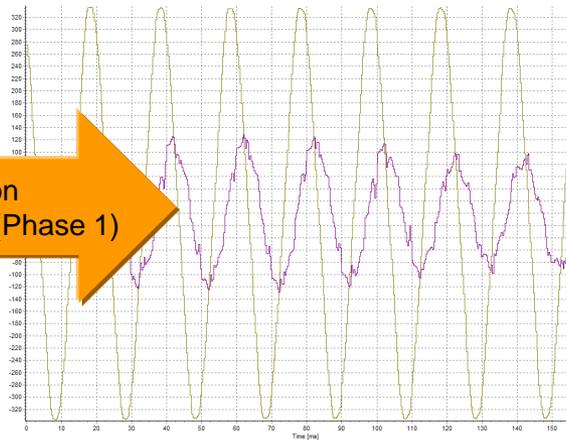
- Problem: Kapazitive Netzverhältnisse, Vermeidung von instabilen Netzsituationen
- Applikation: Kompensation von Oberschwingungen und kapazitiver Blindleistung
- Last: Schweißmaschinen, hohe Anzahl von Frequenzumrichter mit EMV-Kondensatoren

# Applikationsbeispiel

## Softstarter für Asynchronmaschine 100kW (Ski-Bahn)



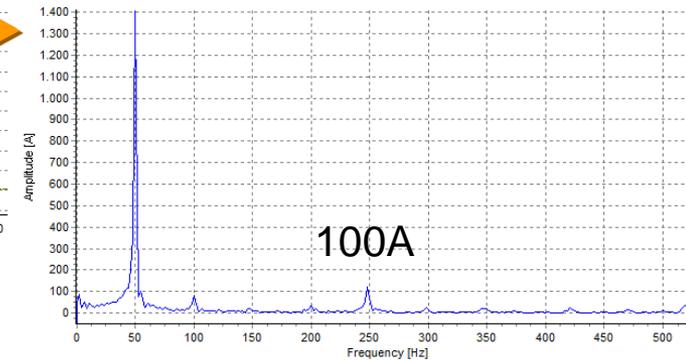
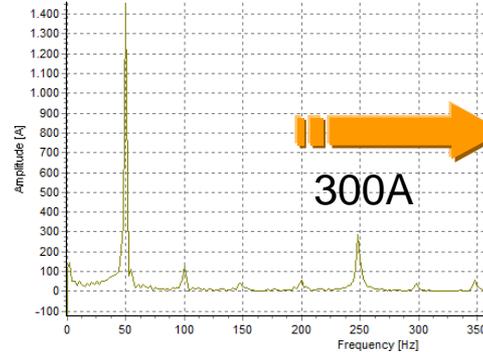
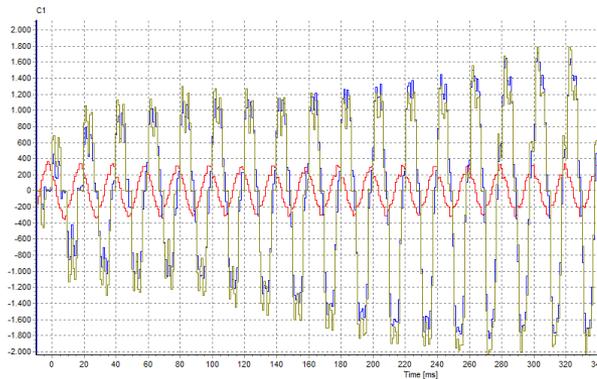
Reduktion von  
Oberschwingungen (Phase 1)



- **Problem:** Phase 1 (Softstarter) → störende Oberschwingungen, Störung Leitsysteme  
Phase 2 (Motor direkt am Netz) → hoher Anteil an Blindarbeit (Kosten!)
- **Applikation:** Phase 1: Oberschwingungs-Kompensation  
Phase 2: Kompensation von Blindleistung
- **Last:** Softstarter (Phasenanschnitt-Steuerung), Asynchronmaschine für Hydraulikpumpe, 100kW

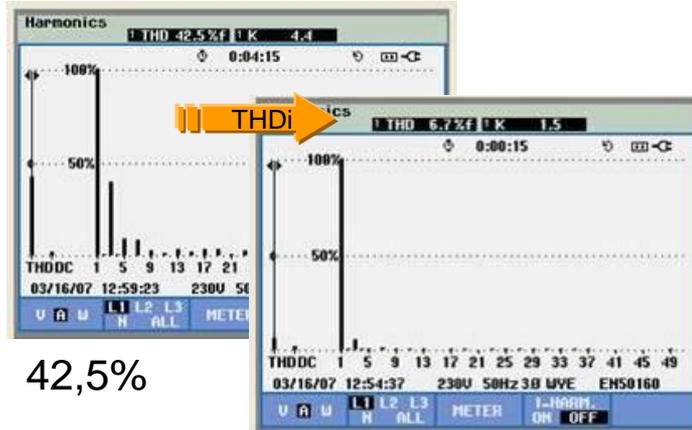
# Applikationsbeispiel

## Elektroantrieb 500kW an Generatornetz (Schiff der Küstenwache)



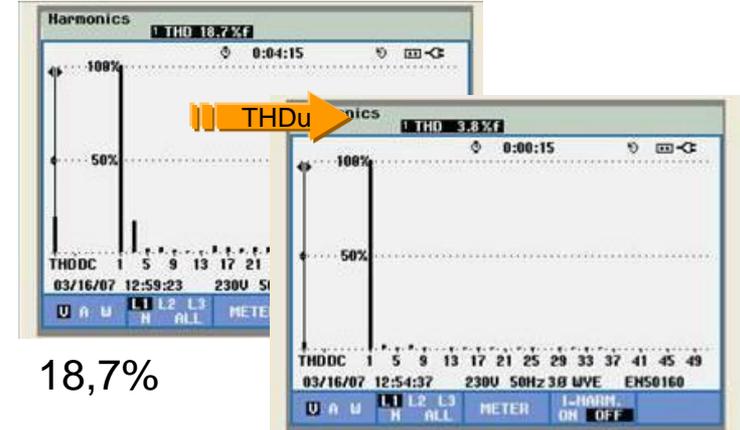
- Problem: massive Oberschwingungen durch Softstarter, Störung Radaranlage
- Applikation: Kompensation von Oberschwingungen während Softstarter-Phase
- Last: weiches Generatornetz, Asynchronmaschine 500kW mit Softstarter („weiches“ Netz)

# Applikationsbeispiel Wärmeofen Halbleiterproduktion



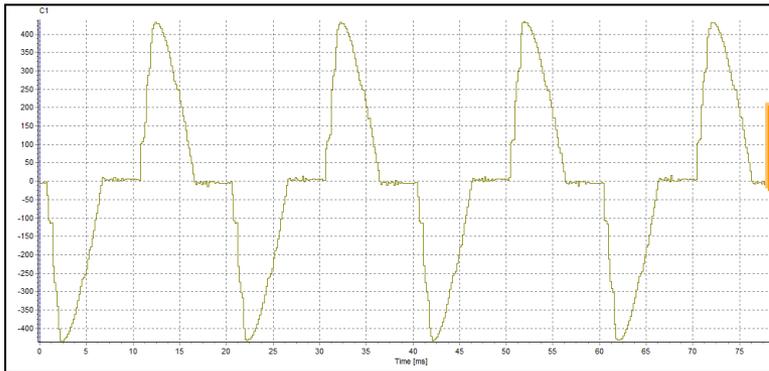
42,5%

6,7%

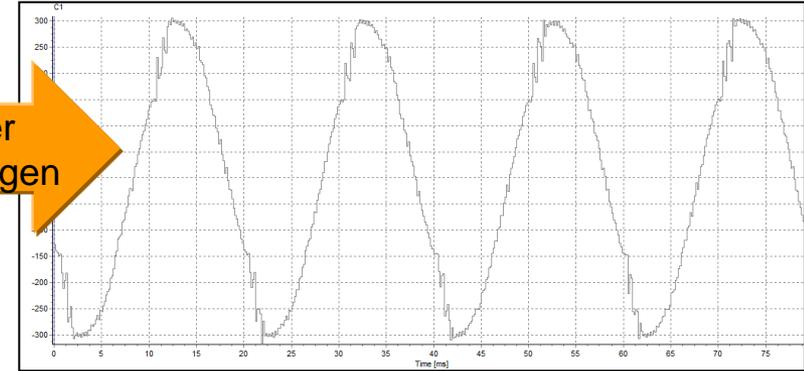


18,7%

3,8%



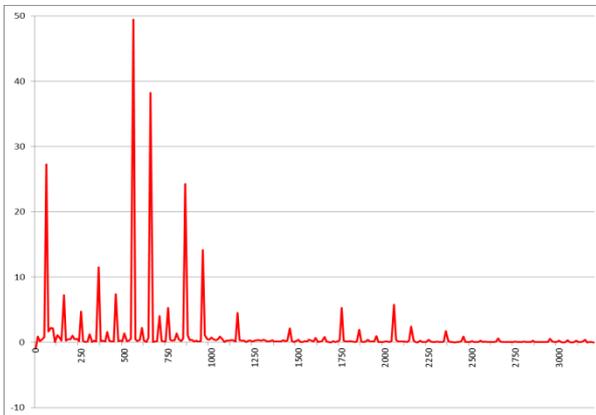
Reduktion der  
Oberschwingungen



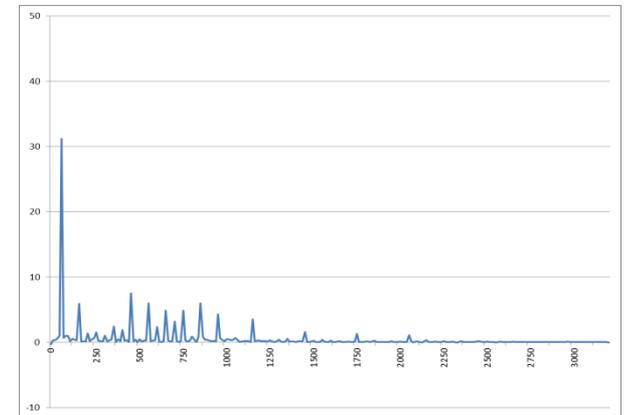
- Problem: massive Spannungsverzerrung, Nullpunktverschiebung, Störungen im gesamten Gebäude, hohe Neutraleiterströme
- Applikation: Kompensation von Oberschwingungen im Phasenstrom und Neutraleiter
- Last: Wärmeofen, Thyristorbrücke 3\*einphasig (L-N) angeschlossen

# Applikationsbeispiel

## Beleuchtung einer Wartungshalle für U-Bahnen

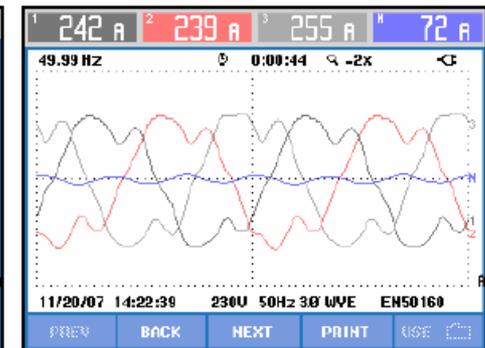
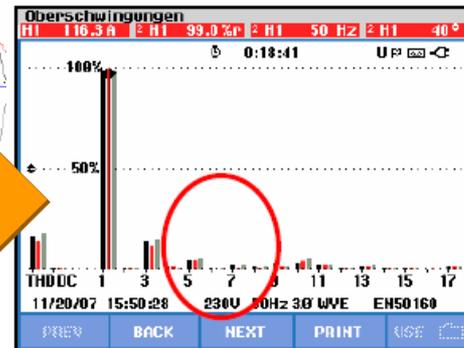
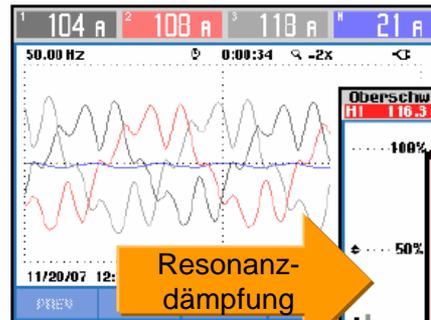
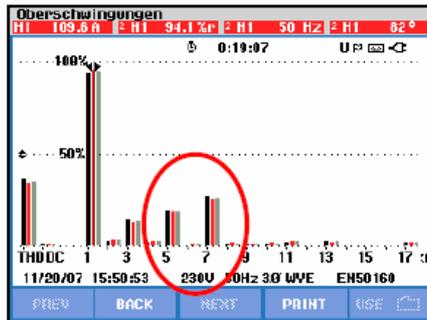


Resonanz-  
dämpfung



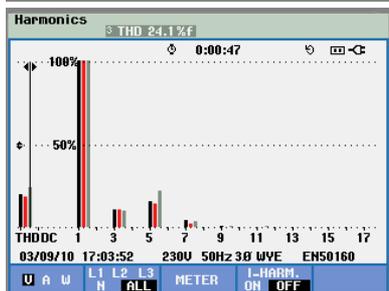
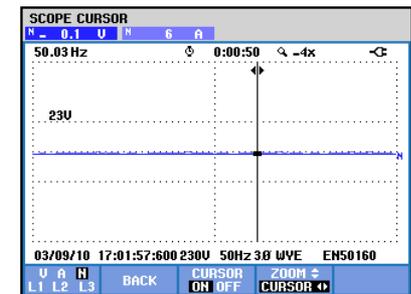
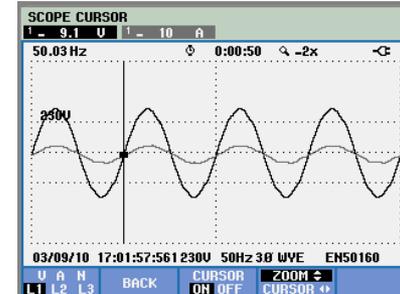
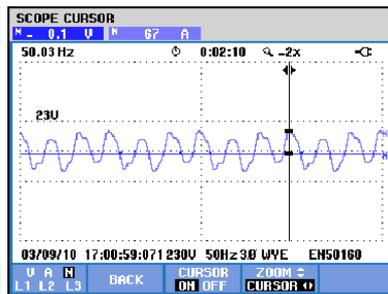
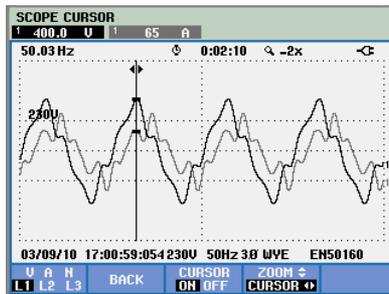
- Problem: Überhitzung von Kabeln, Störung von Messgeräten
- Applikation: Kompensation von Oberschwingungen, Resonanzdämpfung
- Last: 200 Gasentladungslampen mit Kondensatoren zur dezentralen Blindstromkompensation

# Applikationsbeispiel Tunnelbeleuchtung Autobahn

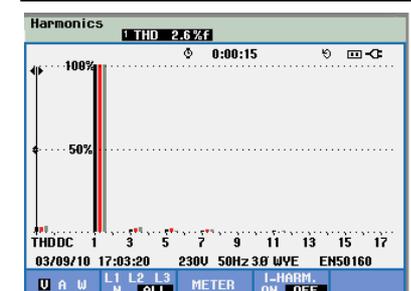


- Problem: Überhitzung von Kabeln und Schützen je nach Schaltzustand in Abhängigkeit von der Außenhelligkeit
- Applikation: Kompensation von Oberschwingungen, Resonanzdämpfung
- Last: 1000 Gasentladungslampen in verschiedenen Schaltgruppen, Kondensatoren zur dezentralen Blindstromkompensation

# Applikationsbeispiel Tunnelbeleuchtung Straßentunnel



Oberschwingungs-  
kompensation

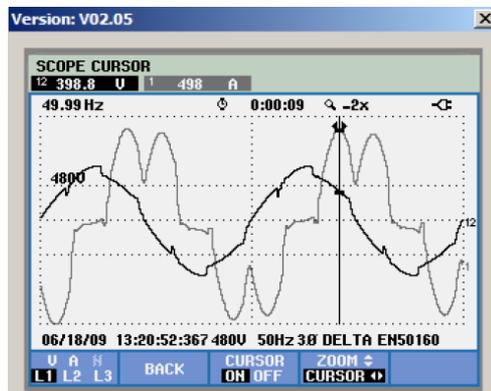


source: Schaffner AG

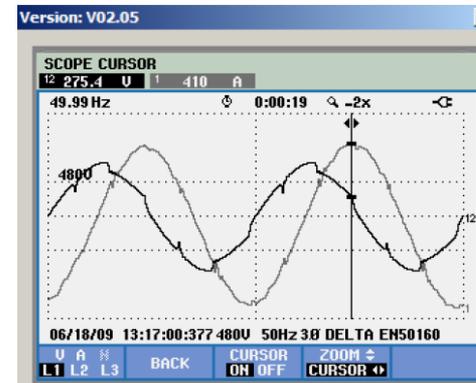
- Problem: Überhitzung des Einspeisetrafos
- Applikation: Oberschwingungskompensation, Resonanzdämpfung, Kompensation Neutralleiterströme
- Last: Tunnelbeleuchtung, Stelltrafo, Kondensatoren zur Blindleistungskompensation

# Applikationsbeispiel

## Antriebstechnik in Papierfabrik

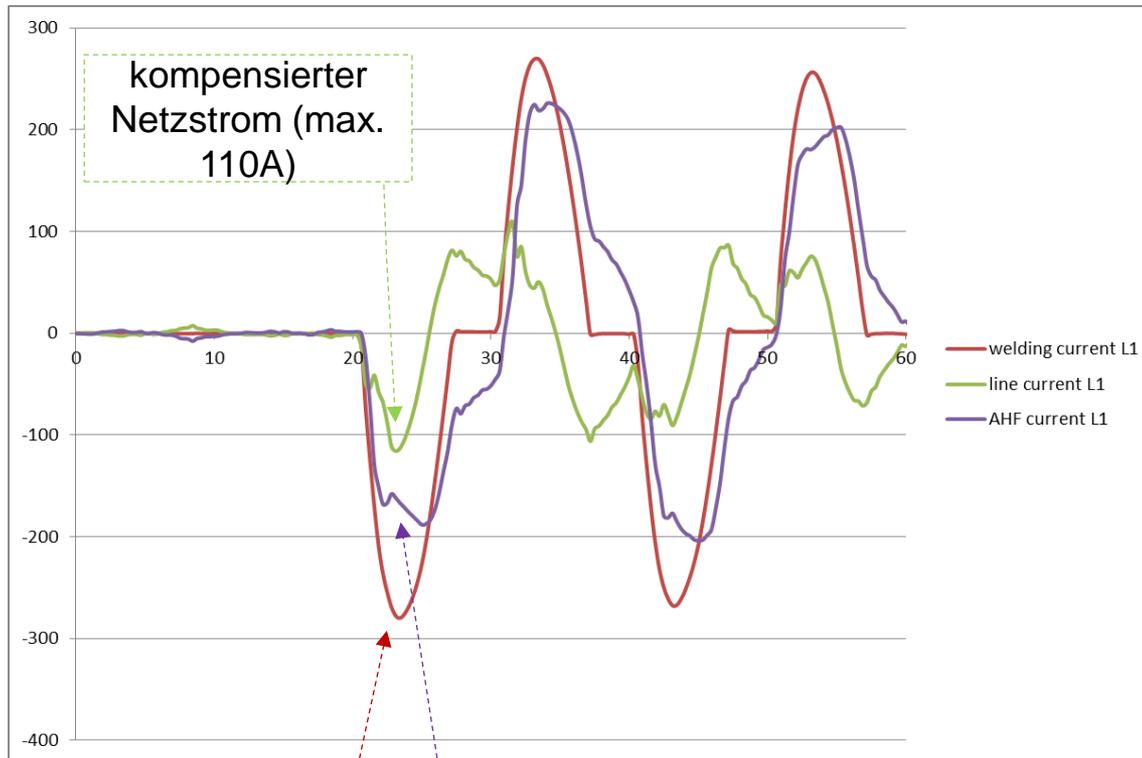


Oberschwungungs-  
kompensation



- Problem: Störung der Leittechnik (Feldbus), unkontrollierte Papierabriss
- Applikation: Oberschwungungskompensation, keine Blindleistungskompensation
- Last: Mix aus DC-Antrieben, Frequenzumrichtern und Antrieben direkt am Netz

# Schnelle Reaktion auf Schweißprozesse Manueller Schweißapparat, angeschlossen zwischen L1-L2



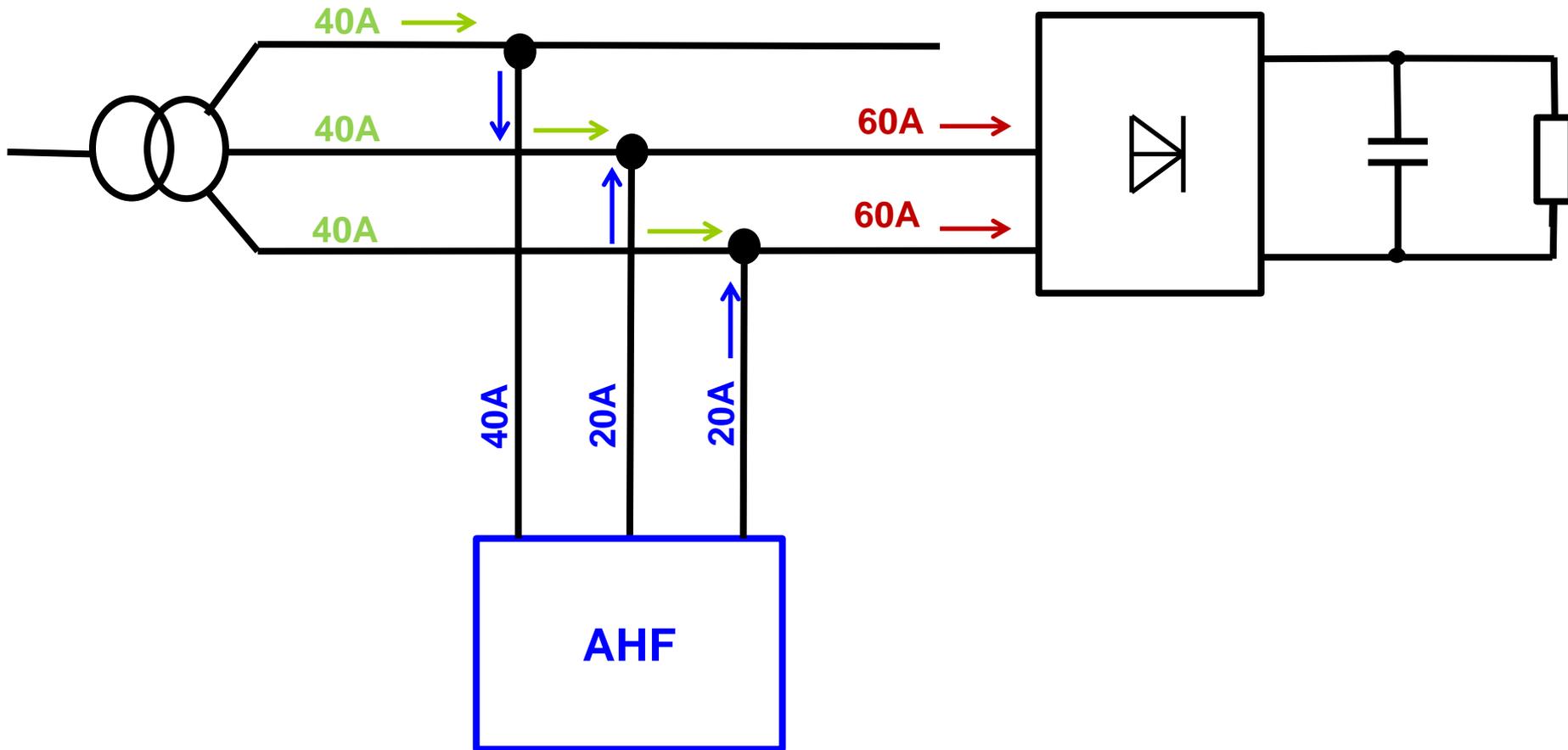
Schweiß-Strom  
(max.280A)

AHF  
Kompensations-  
strom



**Netzstrom reduziert von 280A auf 110A →**  
Reduzierung der Netzbelastung und  
Reduktion der Blindarbeit

## Prinzip der Lastsymmetrierung mit AHF

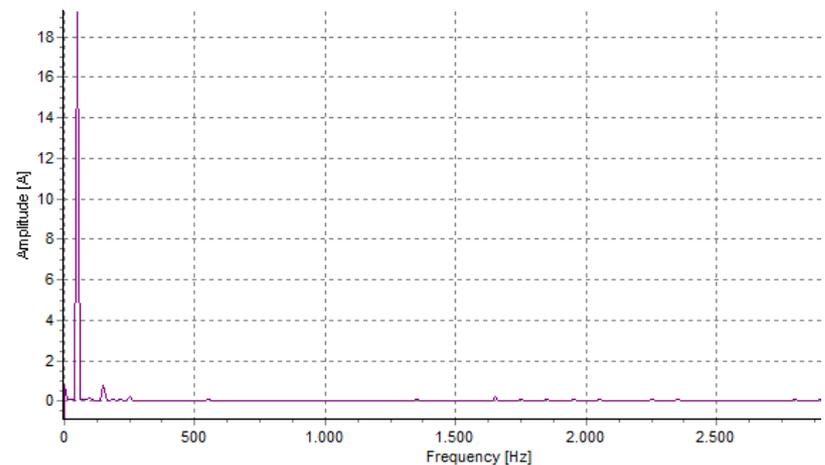
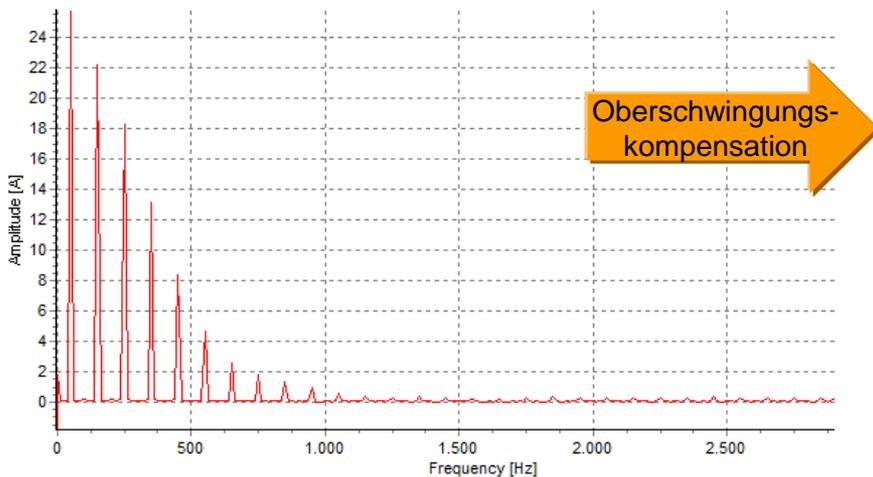
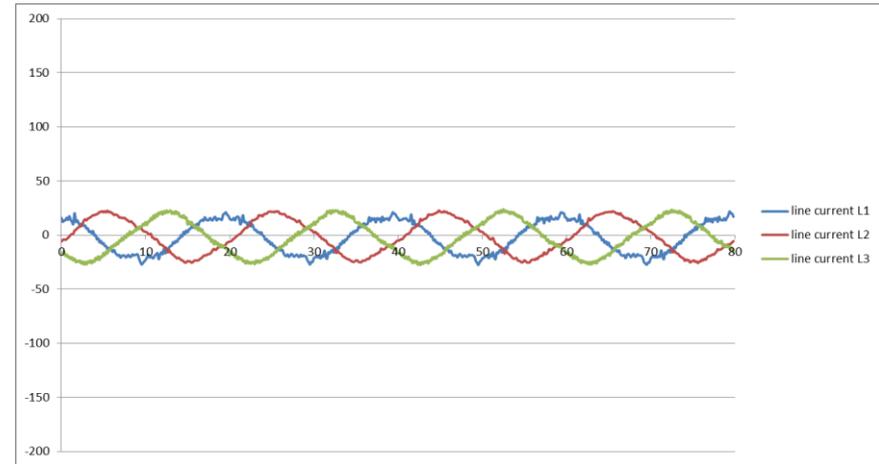
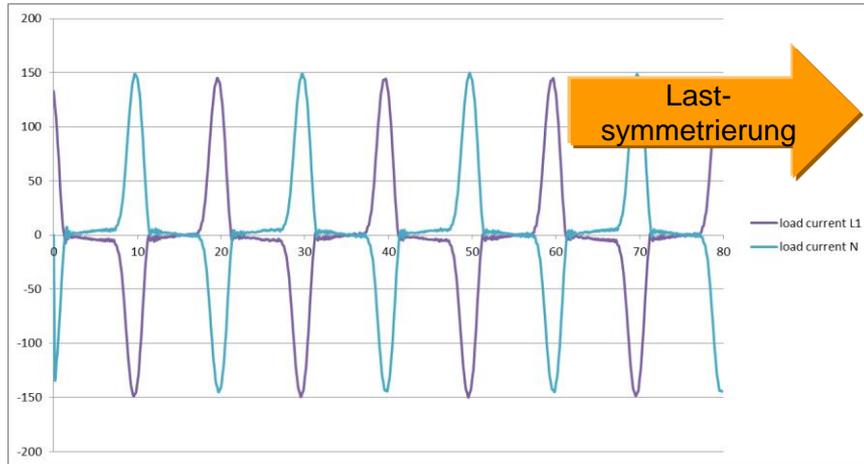


$$P_{\text{line}} = 3 * (230\text{V} * 40\text{A}) \approx 28\text{kW}$$

$$P_{\text{load}} = 2 * (230\text{V} * 60\text{A}) \approx 28\text{kW}$$

# Lastsymmetrierung

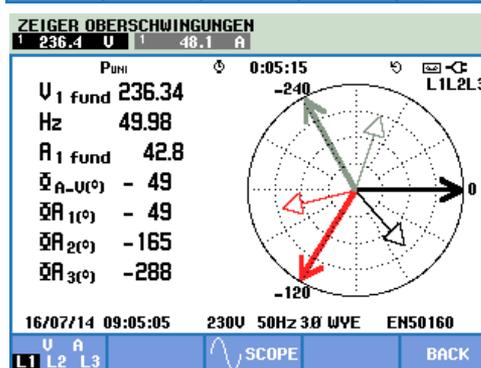
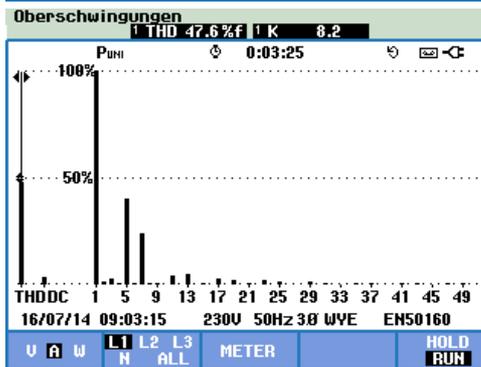
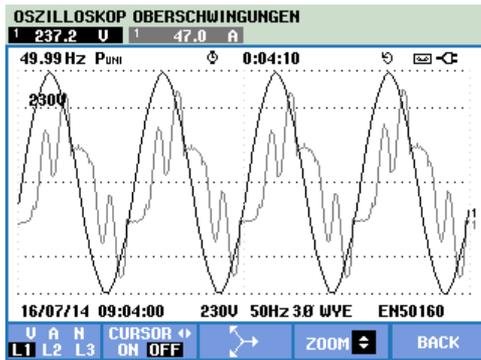
## Einphasiger Gleichrichter mit Widerstandslast (L1 – N)



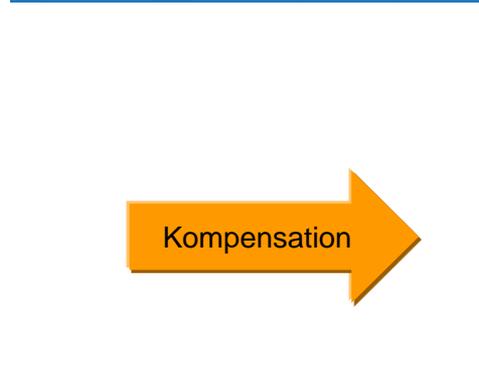
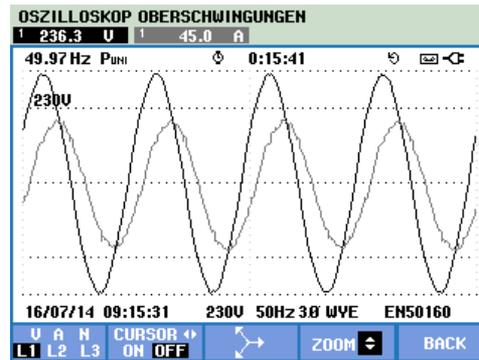
Laststrom (einphasige Last)

symmetrierter und kompensierter Netzstrom

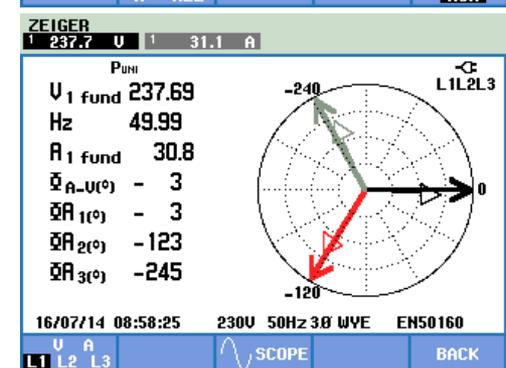
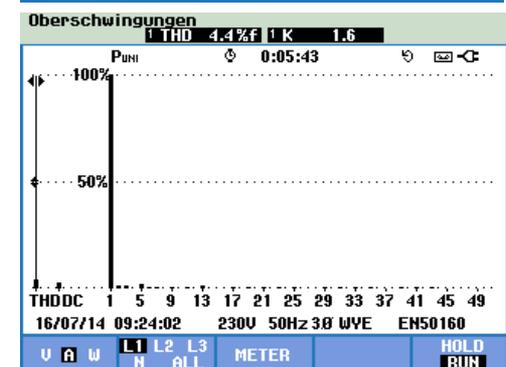
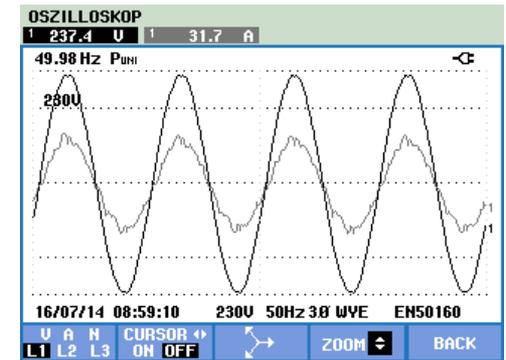
# Messungen Kurvenform



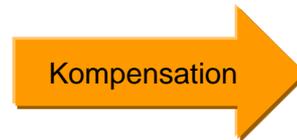
ohne Kompensation



Oberschwingungskompensation aktiv



Oberschwingungs- und Blindstromkompensation aktiv



# Quellen, weiterführende Literatur



## Unter Verwendung von Unterlagen von

- Schäfer Elektronik GmbH
- EPCOS
- condensator dominit GmbH
- KBR GmbH
- Comsys
- MR Reinhausen
- Schaffner AG
- ABB
- NHP, Australien
- Danfoss
- LEW Verteilnetz GmbH, Germany
- LEXEN, Switzerland
- elektronik-kompodium.de
- Wikipedia

Herzlichen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!